



TESIS - TE142599

**IMPLEMENTASI TRANSFORMATOR PENGGESER
FASA PADA SISTEM DISTRIBUSI RADIAL TIGA
FASA UNTUK MENURUNKAN *TOTAL HARMONIC
DISTORTION* (THD)**

RIBKA STEPHANI
2213201007

DOSEN PEMBIMBING
Prof. Ir. Ontoseno Penangsang, M.Sc., Ph.D.
Dr. Rony Seto Wibowo, ST., MT

PROGRAM MAGISTER
BIDANG KEAHLIAN TEKNIK SISTEM TENAGA
JURUSAN TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2015



TESIS - TE142599

***IMPLEMENTATION OF PHASE SHIFTING
TRANSFORMER MODEL TO REDUCE TOTAL
HARMONIC DISTORTION (THD) IN THREE PHASE
RADIAL HARMONIC LOAD FLOW ANALYSIS***

RIBKA STEPHANI

2213201007

ADVISOR

Prof. Ir. Ontoseno Penangsang, M.Sc., Ph.D.

Dr. Rony Seto Wibowo, ST., MT

**MASTER PROGRAM
POWER SYSTEM ENGINEERING
ELECTRICAL ENGINEERING DEPARTMENT
FACULTY OF INDUSTRIAL TECHNOLOGY
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2015**

Tesis disusun untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar
Magister Teknik (MT)
di
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:
RIBKA STEPHANI
NRP. 2213201007

Tanggal Ujian : 17 Juni 2015
Periode Wisuda : September 2015

Disetujui oleh:

1. Prof. Ir. Ontoseno Penangsang, M.Sc., Ph.D. (Pembimbing I)
NIP. 1949 07 15 1974 12 1001
2. Dr. Rony Seto Wibowo, ST., MT. (Pembimbing II)
NIP. 1974 11 29 2000 12 1001
3. Prof. Dr. Ir. Adi Soeprijanto, MT (Penguji)
NIP. 1964 04 05 1990 02 1001
4. Prof. Dr. Eng. Imam Robandi, MT. (Penguji)
NIP. 1963 08 17 1990 03 1001
5. Dr. Ardyono Priyadi, ST., M.Eng (Penguji)
NIP. 1973 09 27 1998 03 1004
6. Dr. Dimas Anton Asfani, ST., MT. (Penguji)
NIP. 1981 09 05 2005 01 1002



Direktur Program Pascasarjana

Prof. Dr. Ir. Adi Soeprijanto, MT
NIP. 1964 04 05 1990 02 1001

IMPLEMENTASI TRANSFORMATOR PENGGESER FASA PADA SISTEM DISTRIBUSI RADIAL TIGA FASA UNTUK MENURUNKAN *TOTAL HARMONIC DISTORTION* (THD)

Nama Mahasiswa : Ribka Stephani
NRP : 2213201007
Pembimbing : 1. Prof. Ir. Ontoseno Penangsang, M.Sc., Ph.D.
2. Dr. Rony Seto Wibowo, ST., MT.

ABSTRAK

Beban listrik *non-linier* merupakan penyebab arus harmonisa pada sistem kelistrikan yang berpengaruh pada kualitas daya listrik dan kerusakan peralatan. Oleh karena itu, diperlukan perhitungan aliran daya harmonisa untuk mengetahui besar dan penyebaran harmonisa pada sistem kelistrikan. Metode analisa aliran daya harmonisa yang digunakan pada sistem distribusi radial tiga fasa pada penelitian ini adalah *backward-forward sweep*. Metode tersebut dikembangkan dengan mempertimbangkan transformator pada proses analisis aliran daya harmonisa. Hasil simulasi menunjukkan bahwa metode ini cukup handal dalam menghitung *Total Harmonic Distortion* (THD) tegangan karena memiliki *error* sebesar 2,44% untuk empat orde hamonisa dan 3,0% untuk enam orde harmonisa dibandingkan dengan *software* ETAP.

Penelitian ini mengembangkan pula model transformator penggeser fasa berupa rangkaian zig-zag. Model transformator ini dapat digunakan untuk menyalurkan daya listrik pada sistem distribusi radial tiga fasa sekaligus mampu mereduksi harmonisa yang terjadi pada sistem. Transformator penggeser fasa adalah sebuah trafo tiga fasa *multi winding* yang gelombang arus dari kumparan *output* satu dengan yang lain berbeda fasa. Perbedaan fasa inilah yang akan mereduksi harmonisa sehingga *Total Harmonic Distortion* (THD) arus yang timbul pada sistem seminimal mungkin. Hasil simulasi menunjukkan *Total Harmonic Distortion* (THD) arus pada sisi primer transformator dengan beban sama besar dimasing-masing *output*, rata-rata pada fasa R, S, dan T turun sebesar 90,97% dan tegangan 99%. *Total Harmonic Distortion* (THD) arus pada sisi primer transformator dengan beban tidak sama besar dimasing-masing *output*, rata-rata pada fasa R, S, dan T turun sebesar 58,435%, 61,212% dan 58,987 dan tegangan 99%.

Kata kunci: Harmonisa, Transformator Penggeser Fasa, Zig-zag Transformator

IMPLEMENTATION OF PHASE SHIFTING TRANSFORMER MODEL TO REDUCE TOTAL HARMONIC DISTORTION (THD) IN THREE PHASE RADIAL HARMONIC LOAD FLOW ANALYSIS

Student Name : Ribka Stephani
Student Identity Number : 2213201007
Supervisor : 1. Prof. Ir. Ontoseno Penangsang, M.Sc., Ph.D.
2. Dr. Rony Seto Wibowo, ST., MT.

ABSTRACT

Non-linear loads cause high harmonics current on radial distribution system. Harmonics in power systems affects the power quality, electricity distribution and damages the equipment. Therefore, an analysis about harmonic frequency was considered necessarily to be conducted in order to determine the transmission and total harmonic distortion in system. Backward-forward sweep methods were applied in radial three phase distribution system. By considering the harmonic and transformer, the result of power flow analysis would be more accurate. The simulation result showed that Total Harmonic Distortion (THD) Voltage had 2.44% errors in four harmonic orders and 3.0% errors in six harmonic orders compared to ETAP software.

The phase-shifted transformer with zig-zag connection was also used in this research. This transformer model was used to run the electrical power in radial 3 phase distribution system and was able to reduce harmonics in distribution system without using any additional equipments. Phase-shifted transformer was a three-phases multi-winding transformer in which the current wave of each windings output had different phase. The different phases could reduce Total Harmonic Distortion (THD) current in distribution system. The simulation showed that, when each output of transformer was in the same amount, Total Harmonic Distortion (THD) current in primary side of transformer could be reduced to 90.97% and voltage could be reduced to 99%. When each output of transformer was not in the same amount, the simulation showed that Total Harmonic Distortion (THD) current in primary side of transformer in phase R, S, and T could be reduced to 58.435%, 61.212% and 58.987 and voltage could be reduced to 99%.

Key words: Harmonics, Phase-shifted Transformer, Zig-zag Transformer

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur Penulis panjatkan kepada Tuhan Yesus Kristus, karena atas tuntunan dan anugerah-Nya Penulis dapat mengerjakan dan menyelesaikan laporan tesis ini dengan baik.

Selama proses pra-pelaksanaan hingga pelaksanaan tesis, penulis banyak dibantu oleh berbagai pihak sehingga tesis ini dapat diselesaikan dengan baik. Oleh karena itu, dalam kesempatan ini penulis ingin mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Bapak Prof. Ir. Ontoseno Penangsang, M.Sc., Ph.D. dan Dr. Rony Seto Wibowo, ST., MT. selaku Dosen Pembimbing yang telah memberikan arahan dan pemahaman serta membimbing penulis dalam menyelesaikan tesis.
2. Bapak Dr. Tri Arief Sardjono, ST., MT. selaku Ketua Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
3. Seluruh keluarga terutama Alm. Papah, Mamah dan Dini tercinta yang telah memberikan perhatian, kasih sayang, semangat, dan doa yang tidak pernah berhenti selama pengerjaan tesis.
4. Rekan-rekan angkatan 2013 terutama Andarini Asri, Ratih M. S., Nita Indriani, Yanuar, dan ade Yuli Prasetyo yang memberi dukungan secara langsung untuk penyelesaian tesis ini.
5. Bapak Ir. Hanny Hosiana Tumbelaka, M.Sc., Ph.D., selaku pimpinan PT. Pancaran Energi Trimanunggal yang telah mendukung, mengayomi, memberi arahan selama masa pengerjaan tesis ini.

Akhir kata, penulis berharap agar laporan ini dapat bermanfaat bagi semua pihak yang membacanya. Terima kasih. Tuhan memberkati.

Surabaya, Mei 2015

Penulis

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR	i
LEMBAR PENGESAHAN	ii
PERNYATAAN KEASLIAN TESIS	iii
ABSTRAK	iv
ABSTRACT	v
DAFTAR ISI	vi
DAFTAR GAMBAR.....	viii
DAFTAR TABEL	x
DAFTAR SIMBOL DAN SINGKATAN	xii
BAB 1 PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Perumusan Masalah	2
1.3 Tujuan	3
1.4 Kontribusi	3
1.5 Batasan Masalah	3
BAB 2 HARMONISA DAN TRANSFORMATOR.....	5
2.1 Harmonisa	5
2.1.1. Pengertian.....	5
2.1.2. Polaritas Komponen Harmonisa	6
2.1.3. Indeks Harmonisa	7
2.1.4. Standar Harmonisa	8
2.2 Transformator	9
2.2.1. Pengertian.....	9
2.2.2. Cara Kerja Transformator	10
2.2.3. Transformator Tiga Fasa	11
2.2.3.1. Hubungan Bintang	12
2.2.3.2. Hubungan Delta atau Segitiga	13
2.2.3.3. Hubungan Zig-zag	14
2.3 Transformator Penggeser Fasa untuk Mereduksi Harmonisa	15
2.3.1. Transformator Penggeser Fasa <i>Multi winding</i>	19

BAB 3 ALIRAN DAYA HARMONISA DENGAN IMPLEMENTASI PEMODELAN TRANSFORMATOR DAN MITIGASI HARMONISA MENGGUNAKAN TRANSFORMATOR PENGGESER FASA	23
3.1 Data Sistem Distribusi Radial 20kV	23
3.2 Aliran Daya Harmonisa Dengan Metode <i>Backward-Forward Sweep</i>	27
3.2.1. Aliran Daya dengan Implementasi Transformator Pada Sistem Distribusi Radial	27
3.2.1.1. <i>Backward Sweep</i>	27
3.2.1.2. <i>Foward Sweep</i>	32
3.2.2. Aliran Daya Harmonisa dengan Implementasi Transformator	32
3.3. Mitigasi Harmonisa dengan Mengimplementasikan Tranformator Penggeser Fasa pada Sistem Distribusi Radial	37
3.3.1. Tiga <i>Output</i> di Sisi Sekunder	37
3.3.2. Rangkaian Transformator Penggeser Fasa Tiga <i>Output</i> di Sisi Sekunder	42
3.3.3. Transformator Penggeser Fasa Mereduksi Harmonisa Pada Sistem Distribusi Radial	46
BAB 4 SIMULASI DAN ANALISIS DATA	47
4.1. Aliran Daya Harmonisa dengan Implementasi Transformator ...	47
4.1.1. Beban Tiga Fasa Seimbang	47
4.1.2. Beban Tiga Fasa Tidak Seimbang	58
4.1.3. Aliran Daya Harmonisa dengan Menggunakan Transformator Penggeser Fasa	67
BAB 5 PENUTUP	85
5.1 Kesimpulan	85
5.2 Saran	86
DAFTAR PUSTAKA	
INDEKS	

DAFTAR TABEL

2.1. Polaritas dari Komponen Harmonik	7
2.2. Akibat dari Polaritas Komponen Harmonik.....	7
2.3. <i>Voltage Distortion Limits</i>	9
2.4. <i>Current Distortion Limits</i>	9
2.5. Kelompok Hubungan Menurut V D E 0532	16
2.6. Hasil Pengurangan Harmonisa dengan Sudut Pergeseran 20°	21
3.1. Data Saluran Penyulang Kaliasin.....	24
3.2. Data Beban Penyulang Kaliasin.....	24
3.3. Data Transformator Penyulang Kaliasin.....	25
3.4. Submatrik Yt untuk Transformator <i>Step-Down</i>	28
3.5. Injeksi Harmonik pada Beban.....	33
4.1. Perbandingan Hasil Perhitungan Aliran Daya Harmonisa dengan <i>Software</i> MATLAB dan <i>Software</i> ETAP (4 Orde Harmonisa)	48
4.2. Perbandingan <i>Total Harmonic Distortion</i> (THD) antara <i>Software</i> MATLAB dan <i>Software</i> ETAP	50
4.3. Perbandingan Hasil Perhitungan Aliran Daya Harmonisa dengan <i>Software</i> MATLAB dan <i>Software</i> ETAP (6 Orde Harmonisa)	53
4.4. Perbandingan <i>Total Harmonic Distortion</i> (THD) antara <i>Software</i> MATLAB dan <i>Software</i> ETAP (6 Orde Harmonisa)	56
4.5. Hasil Aliran Daya Harmonisa dengan Beban Tidak Seimbang (4 Orde Harmonisa)	59
4.6. Hasil Aliran Daya Harmonisa dengan Beban Tidak Seimbang (6 Orde Harmonisa)	61
4.7. Injeksi Arus Harmonisa.....	63
4.8. Hasil Aliran Daya Harmonisa dengan Beban Tidak Seimbang (10 Orde Harmonisa)	64
4.9. Harmonisa Arus di Sisi Primer Transformator Sistem Distribusi Kaliasin 67	
4.10. Harmonisa Tegangan di Sisi Primer Transformator Sistem Distribusi Kaliasin.....	72

4.11. Harmonisa Arus di Sisi Primer Transformator Sistem Distribusi Kaliasin dengan Tiga <i>Output</i> Transformator (6 Orde Harmonisa)	74
4.12. Harmonisa Tegangan di Sisi Primer Transformator Sistem Distribusi Kaliasin dengan Tiga <i>Output</i> Transformator (6 orde harmonisa).....	77
4.13. Harmonisa Arus di Sisi Primer Transformator Sistem Distribusi Kaliasin dengan Tiga Output Transformator Beban Tidak Seimbang (6 orde harmonisa).....	79
4.14. Harmonisa Tegangan di Sisi Primer Transformator Sistem Distribusi Kaliasin dengan Tiga Output Transformator Beban Tidak Seimbang (6 orde harmonisa).....	81

DAFTAR SIMBOL DAN SINGKATAN

THD	=	<i>Total Harmonic Distortion</i>
IHD	=	<i>Individual Harmonic Distortion</i>
$IEEE$	=	<i>Institute of Electrical and Electronic Engineers</i>
RMS	=	<i>Root Mean Square</i>
TDD	=	<i>Total Demand Distortion</i>
$BIBC$	=	<i>Bus Injection to Branch Current</i>
$BCBV$	=	<i>Branch Current to Bus Voltage</i>
I_{sc}	=	<i>Arus Short Circuit</i>
I_L	=	<i>Arus Beban</i>
h	=	<i>Orde Harmonik</i>
e_p	=	<i>GGL Induksi pada kumparan primer</i>
e_p	=	<i>GGL Induksi pada kumparan sekunder</i>
N_p	=	<i>Jumlah kumparan kumparan primer</i>
$d\phi$	=	<i>Perubahan garis-garis magnit dalam satuan weber</i>
dt	=	<i>Perubahan waktu dalam satuan detik</i>
N_s	=	<i>Jumlah kumparan sekunder</i>
a	=	<i>Nilai perbandingan kumparan transformator</i>
V_{ab}	=	<i>Tegangan antar fasa a-b</i>
V_{bc}	=	<i>Tegangan antar fasa b-c</i>
V_{ca}	=	<i>Tegangan antar fasa c-a</i>
V_a	=	<i>Tegangan fasa a</i>
V_b	=	<i>Tegangan fasa b</i>
V_c	=	<i>Tegangan fasa c</i>
I_{al}	=	<i>Arus sesaat dari fasa a</i>
I_{bl}	=	<i>Arus sesaat dari fasa b</i>
I_{cl}	=	<i>Arus sesaat dari fasa c</i>

Y_t	=	<i>Admitansi transformator</i>
Z_t	=	<i>Impedansi Transformator</i>
Y_{pp}	=	<i>Admintansi belitan primer – primer</i>
Y_{ss}	=	<i>Admintansi belitan sekunder – sekunder</i>
Y_{ps}	=	<i>Admintansi belitan primer – sekunder</i>
Y_{sp}	=	<i>Admintansi belitan sekunder – primer</i>
Y_g	=	<i>Belitan transformator hubungan Y yang diketanahkan</i>
Y	=	<i>Belitan transformator hubungan Y</i>
Δ	=	<i>Belitan transformator hubungan Δ</i>
I_p	=	<i>Arus Primer Transformator</i>
I_s	=	<i>Arus Sekunder Transformator</i>
V_p	=	<i>Tegangan Primer Transformator</i>
V_s	=	<i>Tegangan Sekunder Transformator</i>
$Ih_i^{(h)}$	=	<i>Arus injeksi beban non linier pada bus i pada harmonisa orde h</i>
$V_i^{(h)}$	=	<i>Tegangan harmonisa pada bus i harmonisa orde h</i>
$Z_i^{(h)}$	=	<i>Impedansi ekivalen dari beban linier pada bus i harmonisa ke h</i>
$A_{ij}^{(h),k}$	=	<i>Koefisien vektor arus harmonisa yang melewati saluran</i>
$Ah_{ij}^{(h),k}$	=	<i>Koefisien vektor dari sumber harmonisa dan beban non linear</i>
$[A]$	=	<i>Matrik arus harmonisa yang melewati saluran</i>
$[HA]$	=	<i>Matrik impedansi yang dilewati arus harmonisa</i>
X	=	<i>Reaktansi saluran</i>
X_L	=	<i>Reaktansi inductor</i>
X_h	=	<i>Reaktansi orde harmonik ke h</i>
R	=	<i>Resistansi saluran</i>
U_1	=	<i>Resultan Koneksi Zig-zag</i>
U_{12}	=	<i>Lengan Zig-zag</i>

DAFTAR GAMBAR

2.1. Gelombang <i>Non Linear</i> dengan Menambahkan Harmonisa Ketiga Frekuensi Fundamental	6
2.2. Frekuensi fundamental, kelipatan kedua, dan kelipatan ketiga	6
2.3. Konstruksi Dasar Transformer	10
2.4. Diagram Fasor dari Trafo Tiga-Fasa dalam Hubungan Y	12
2.5. Diagram Fasor Trafo Tiga Fasa dalam Hubungan Δ	13
2.6. Hubungan Zig-Zag	14
2.7. Hubungan Kumputan Transformator Tiga Fasa dengan Zig-Zag <i>Winding Basic</i>	15
2.8. Transformer Pergeseran Fasa dengan Dua <i>Output</i> di Sisi Sekunder	17
2.9. Perubahan Bentuk Gelombang pada Sisi Primer setelah Dilakukan Pergeseran Fasa Pada Kumputan Sekunder Transformer	17
2.10. Pergeseran Fasa 30° Menghilangkan Harmonisa Arus ke 5 dan ke 7	18
Analisa Vektor pada Harmonisa ke 11 dan ke 13 dengan Pergeseran Fasa Sejauh 30°	19
3.1. Penyulang Kaliasin	26
3.2. <i>Single Line Diagram</i> dengan Metode <i>Network Topology</i>	30
3.3. Pergeseran Fasa pada <i>Output</i> Pertama Sejauh 30°	37
3.4. (a) Hubungan Zig-Zag dari Rangkaian Dz0 (b) U_1 Merupakan Resultan dari U_{1Y} Dan U_{1Z}	38
3.5. Uraian Rangkaian Zig-Zag dengan Pergeseran Fasa 0°	39
3.6. Nilai Sudut α pada Rangkaian Zig-Zag Posisi 0°	40
3.7. Perbedaan Sudut Fasa antara <i>Output</i> 1 dan U_1 (<i>Output</i> 2) Sebesar 20°	41
3.8. Perbedaan Sudut Fasa antara <i>Output</i> 1 dan U_1 (<i>Output</i> 3) Sebesar 40°	41
3.9. Perbedaan Sudut Fasa Sebesar 20° antara <i>Output</i> 1, <i>Output</i> 2, dan <i>Output</i> 3	42
3.10. Rangkaian Delta pada Sisi Primer Trafo dan Rangkaian Y pada Sisi Sekunder Trafo	43
3.11. (a) Hubungan Kumputan dengan Rangkaian Zig-Zag (b) Rangkaian Zig-Zag pada Sisi Sekunder Transformator	44

3.12. Transformator Penggeser Fasa dengan Tiga <i>Output</i> di Sisi Sekunder.....	45
4.1. Perbandingan <i>Total Harmonic Distortion</i> (THD) antara <i>Software</i> MATLAB dan <i>Software</i> ETAP dengan <i>Error</i> 2,44%.....	52
4.2. Perbandingan <i>Total Harmonic Distortion</i> (THD) antara <i>Software</i> MATLAB dan <i>Software</i> ETAP (6 Orde Harmonisa) dengan <i>Error</i> 3,0%.	58
4.3. Gelombang Arus pada Masing-masing <i>Output</i> Transformator Penggeser Fasa	69
4.4. Vektor harmonisa ke 5 pada fasa R.....	70
4.5. Vektor pada Harmonisa ke 17 pada Fasa R dengan Pergeseran Fasa Sejauh 20°	71
4.6. Gelombang Arus pada Fasa R di Sisi Primer Transformer Penggeser Fasa Tiga <i>Output</i> di Sisi Sekunder	71

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Transformator berfungsi untuk mengkonversi energi listrik arus bolak-balik dari level tegangan satu menuju level tegangan yang lain. Berkaitan dengan fungsi tersebut, transformator menjadi elemen penting dalam proses distribusi daya listrik yang bersentuhan langsung dengan beban-beban listrik. Beban listrik terbagi menjadi dua jenis yaitu beban listrik linier (resistor, kapasitor, dan induktor) dan beban listrik non linier (komponen semikonduktor). Beban listrik non linier menghasilkan arus yang tidak sinusoidal meskipun sumber tegangan yang dipakai adalah gelombang sinusoidal murni. Setiap gelombang periodik yang tidak berbentuk sinus mengandung harmonisa (C. Sankaran, 2002). Beban listrik non linier merupakan penyebab arus harmonisa yang tinggi terjadi pada sistem kelistrikan. Penyebaran harmonisa dalam sistem distribusi daya listrik tersebut menimbulkan kerugian dalam penyaluran energi listrik dan kerusakan pada peralatan.

Meninjau akibat yang ditimbulkan dari penyebaran harmonisa tersebut, maka analisis aliran daya harmonisa diperlukan untuk mengetahui dan menganalisa penyebaran dan besar harmonisa pada proses distribusi. Metode analisa aliran daya harmonisa pada sistem distribusi radial yang saat ini dikembangkan yaitu *backward-forward sweep*. Mulanya, metode ini digunakan untuk analisis aliran daya radial tiga fasa (J.Nanda, 2000), kemudian dikembangkan dengan mempertimbangkan harmonisa menjadi analisa aliran daya harmonisa (Akhmad Danyal, 2013).

Selain harmonisa, salah satu elemen yang menentukan ketepatan analisis aliran daya adalah pemodelan transformator. Hal yang menyebabkan transformator perlu untuk dipertimbangkan dalam proses perhitungan aliran daya radial (Mamdouh Abdel-Akher dan Karar Mahmoud, 2013) adalah:

1. Keakuratan hasil akhir aliran daya dipengaruhi oleh variasi koneksi transformator.

2. Asumsi bilangan kompleks untuk model *power load*, *PQ load*, dan komponen urutan nol dapat mengarahkan aliran daya menuju solusi yang akurat.

Pada penelitian Mamdouh Abdel-Akher dan Karar Mahmoud, telah dibuat pemodelan transformator yang diimplementasikan pada metode *backward-forward sweep* untuk menganalisa aliran daya pada sistem distribusi radial. Berbeda dengan penelitian tersebut, penelitian ini akan memperhitungkan transformator untuk analisis aliran daya harmonisa pada sistem distribusi radial. Pemodelan ini disesuaikan dengan koneksi trafo yang dipergunakan.

Setelah perhitungan aliran daya harmonisa dengan implementasi transformator dilakukan, maka filter yang tepat untuk menurunkan harmonisa pada sistem distribusi dapat dirancang. Salah satu alat yang dapat digunakan untuk menurunkan harmonisa adalah transformator penggeser fasa. Transformator ini memiliki perbedaan sudut fasa antara *output* satu dengan yang lain. Hal ini menyebabkan *cancellation* pada orde harmonisa tertentu sehingga arus harmonisa di sisi primer trafo mengalami penurunan. Dengan demikian pada penelitian ini akan diimplementasikan pula trafo penggeser fasa *multi winding* dengan rangkaian zig-zag pada aliran daya harmonisa. Cara ini diharapkan dapat membuat transformator berperan sebagai penyalur daya listrik sekaligus mengurangi harmonisa yang terjadi pada sistem.

1.2. Perumusan Masalah

Pada penelitian ini, beberapa hal yang akan dibahas yaitu:

1. Bagaimana metode *backward-forward sweep* dengan implementasi transformator dapat digunakan untuk menghitung aliran daya harmonisa sistem distribusi radial tiga fasa.
2. Bagaimana transformator penggeser fasa dengan integrasi koneksi zig-zag dapat digunakan untuk menurunkan *Total Harmonic Distortion* (THD) pada sistem.

1.3. Tujuan

Tujuan penelitian ini yaitu:

1. Memperoleh integrasi model transformator dengan metode *backward-forward sweep* dalam menghitung aliran daya harmonisa sistem distribusi radial tiga fasa.
2. Memperoleh integrasi model transformator dengan koneksi zig-zag pada transformator penggeser fasa .
3. Mencari perbandingan metode analisis aliran daya harmonisa yang digunakan dengan analisis aliran daya harmonisa yang sudah tervalidasi (*software* ETAP).

1.4. Kontribusi

Harmonisa pada sistem distribusi radial diharapkan dapat dideteksi dan dikurangi dengan metode yang dirancang. Pengembangan penelitian ini adalah perhitungan aliran daya harmonisa dengan implementasi transformator dan mempertimbangkan transformator penggeser fasa untuk mengurangi *Total Harmonic Distortion* (THD) pada sistem distribusi radial tiga fasa. Diharapkan penelitian ini memberi kontribusi untuk menyelesaikan permasalahan kualitas daya secara khusus harmonisa yang terdapat pada sistem distribusi radial tiga fasa.

1.5. Batasan Masalah

Penelitian ini dibatasi pada beberapa hal:

1. Studi aliran daya harmonisa yang dilakukan hanya terbatas untuk sistem distribusi radial tiga fasa.
2. Metode yang digunakan untuk studi aliran daya harmonisa ini adalah implementasi model transformator pada metode *backward-forward sweep*.
3. Mitigasi Harmonisa dengan mengimplementasikan transformator penggeser fasa.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB 2

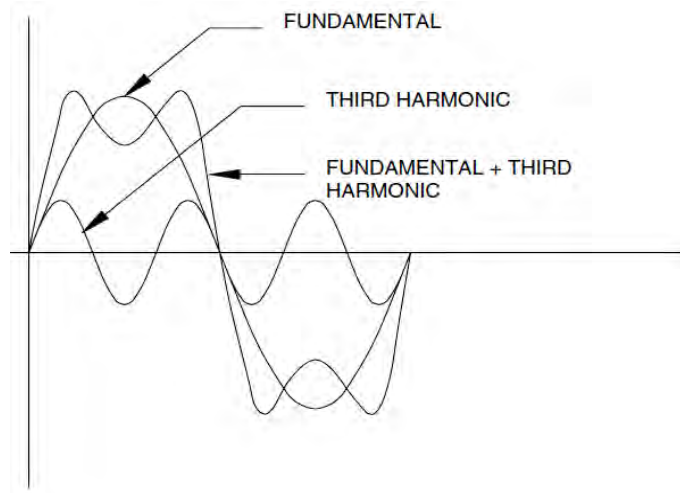
HARMONISA DAN TRANSFORMATOR

2.1. Harmonisa

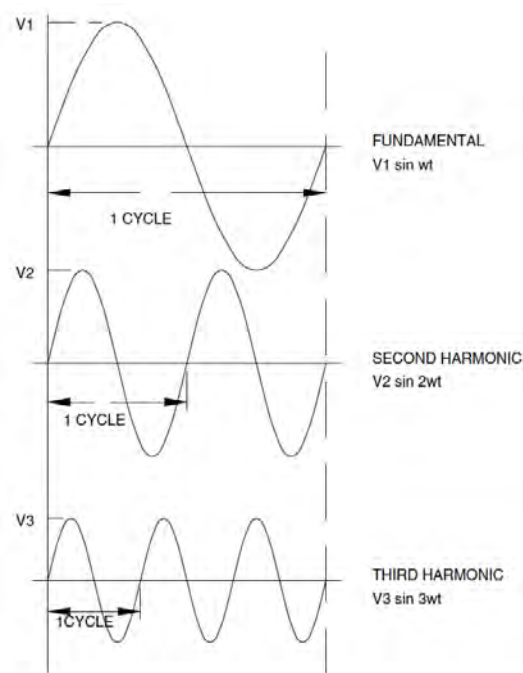
2.1.1. Pengertian

Harmonik adalah penjumlahan gelombang dengan berbagai frekuensi berbeda yang merupakan perkalian bilangan bulat dari frekuensi dasarnya. Misal, frekuensi dasar suatu sistem tenaga listrik adalah 50 Hz, maka harmonisa kedua adalah frekuensi sebesar 100 Hz, harmonisa ketiga adalah gelombang dengan frekuensi sebesar 150 Hz dan seterusnya.

Dalam sistem tenaga listrik dikenal dua jenis beban yaitu beban *linear* dan beban *non linier*. Beban *linear* merupakan beban yang memberikan bentuk gelombang keluaran yang *linear* karena arus yang mengalir sebanding dengan impedansi dan perubahan tegangan. Sedangkan beban *non linier* menghasilkan arus yang tidak sinusoidal meskipun sumber tegangan yang dipakai pada saat itu adalah gelombang sinus yang murni. Distorsi gelombang sinus ini terjadi karena gelombang-gelombang harmonisa menumpang pada gelombang frekuensi dasar, sehingga terbentuk gelombang cacat yang merupakan jumlah antara gelombang murni sesaat dan gelombang harmonisanya seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.1. Beban *non linier* pada peralatan listrik yaitu seperti *inverter*, *converter*, lampu *fluorencent* yang menggunakan *electronic ballast* dan sebagainya.



Gambar 2.1. Gelombang *Non linier* dengan Menambahkan Harmonisa Ketiga Frekuensi Fundamental (C. Sankaran, 2002)



Gambar 2.2. Frekuensi Fundamental, Kelipatan Kedua, dan Kelipatan Ketiga. (C. Sankaran, 2002)

2.1.2. Polaritas Komponen Harmonisa

Urutan polaritas harmonik pertama adalah positif. Urutan polaritas harmonik kedua adalah negatif, harmonik ketiga adalah nol, dan harmonik keempat adalah positif (berulang berurutan sampai seterusnya).

Tabel 2.1 Polaritas dari Komponen Harmonik

Frekuensi (Hz)	Indeks Harmonisa	Urutan
50	1	+
100	2	-
150	3	0
200	4	+
250	5	-
300	6	0
350	7	+
400	8	-
450	9	0

Sumber: Philip J.A. Ling, 2004

Tabel 2.2 Akibat dari Polaritas Komponen Harmonik

Urutan	Pengaruh pada motor	Pengaruh pada sistem distribusi
Positif	Menimbulkan medan magnet putar arah maju (<i>forward</i>)	-Panas
Negatif	Menimbulkan medan magnet putar arah mundur (<i>revers</i>)	-Panas -Arah putaran motor berubah
Nol	Tidak ada	-Panas -Menimbulkan/menambah arus pada kawat netral

2.1.3. Indeks Harmonisa

Menurut *Institute of Electrical and Electronic Engineers* (IEEE), *Individual Harmonic Distortion* (IHD) adalah rasio antara nilai RMS dari masing-masing arus harmonisa dibandingkan dengan nilai RMS arus fundamental atau

harmonisa pertama. Berdasarkan metode ini, maka harmonisa pertama atau arus fundamental selalu bernilai 100%. Rumus perhitungan IHD menurut IEEE adalah sebagai berikut (C. Sankaran, 2002):

$$IHD_n = \frac{I_n}{I_1} \times 100\% \quad (2.1)$$

Total Harmonic Distortion (THD) adalah rasio antara nilai rms dari seluruh komponen harmonisa dan nilai rms dari fundamental yang dinyatakan dalam persen (%) (C. Sankaran, 2002):

$$I_H = \sqrt{(I_2^2 + I_3^2 + I_4^2 + I_5^2 + I_6^2 + I_7^2 + \dots)} \quad (2.2)$$

$$THD = (I_H / I_1) \times 100\% \quad (2.3)$$

Total Harmonic Distortion (THD) Indeks yang umum digunakan adalah:

$$THD = \sqrt{\frac{\sum_{n=2}^N V_n^2}{V_1^2}} \quad (2.4)$$

dengan :

V_n = tegangan rms pada harmonisa ke n (volt)

V_1 = tegangan fundamental (volt)

N = maksimum harmonisa

Pendefinisian rasio nilai rms komponen harmonisa ke nilai rms komponen dasar biasanya dinyatakan dalam bentuk persen. Indeks ini digunakan untuk mengukur deviasi bentuk gelombang periodik yang mengandung harmonisa dari gelombang sinus sempurna. Nilai THD adalah nol pada saat terjadi gelombang sinus sempurna.

2.1.4. Standar Harmonisa

%VTHD adalah persentasi total tegangan yang terdistorsi oleh harmonisa terhadap frekuensi fundamental dan %ITHD adalah persentasi jumlah total arus yang terdistorsi oleh harmonisa terhadap frekuensi fundamental. Standar harmonisa tegangan yang dipergunakan menurut IEEE Std. 519-1992, p.85 [2.1]. untuk *Voltage Harmonic Distortion* adalah sebagai berikut :

Tabel 2.3 *Voltage Distortion Limits*

Bus Voltage at PCC	Individual Voltage Distortion (%)	Total Voltage Distortion THD (%)
69 kV and below	3,0	5,0
69,001 kV through 161 kV	1,5	2,5
161,001 kV and above	1,0	1,5
NOTE: High-voltage systems can have up to 2,0% THD where the cause is an HVDC terminal that will attenuate by the time it is tapped for user		

Sumber: Blooming, P.E, Carnovale, J. Daniel, 2007

Standar harmonisa arus yang dipergunakan menurut IEEE Std. 519-1992 [10.3]; [10.4]; [10.5] yaitu untuk *Current Distortion Limits* adalah sebagai berikut.

Tabel 2.4 *Current Distortion Limits*

Maximum Harmonic Current Distortion in Percent of I_L						
Individual Harmonic Order (Odd Harmonics)						
I_{sc}/I_L	<11	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h$	TDD
<20*	4,0	2,0	1,5	0,6	0,3	5,0
20<50	7,0	3,5	2,5	1,0	0,5	8,0
50<100	10,0	4,5	4,0	1,5	0,7	12,0
100<1000	12,0	5,5	5,0	2,0	1,0	15,0
>1000	15,0	7,0	6,0	2,5	1,4	20,0
Even harmonics are limited to 25% of the odd harmonic limits above						
Current distortions that result in a dc offset , e.g., half-wave converters, are not allowed						
*All power generation equipment is limited to these values of current distortion, regardless of actual I_{sc}/I_L						
where I_{sc} = maximum short-circuit current at PCC. I_L = maximum demand load current (fundamental frequency component) at PCC						

Sumber: IEEE Std 519-1992, 1993

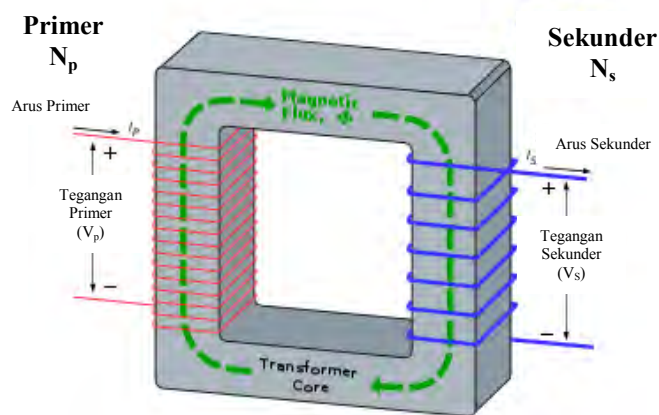
2.2. Transformator

2.2.1. Pengertian

Transformator merupakan alat untuk memindahkan daya listrik arus bolak-balik dari rangkaian satu ke rangkaian lain secara induksi elektromagnetik.

Transformator terdiri dari kumparan primer, sekunder, tersier dan lain-lain serta inti besi. Inti transformator terbuat dari lembaran besi silicon yang tipis-tipis dan diberi lapisan laminasi tipis dari Varnish atau *Oxide layer*. Hal ini dilakukan untuk menghindari arus induksi pusar (*Eddy Current Loss*). Bentuk inti secara umum dibagi menjadi 2 yaitu *type shell* dan *type core*. Inti transformator yang terbuat dari besi berlapis dan dua kumparan, yaitu kumparan primer dan kumparan sekunder (Soebagio, 2012).

Kumparan yang dihubungkan dengan sumber arus bolak balik disebut kumparan primer dan kumparan yang dihubungkan dengan beban disebut kumparan sekunder. Rasio perubahan tegangan akan bergantung dari rasio jumlah kumparan pada kedua kumparan. Biasanya kumparan terbuat dari kawat tembaga yang dibelit seputar kaki transformator. Bila tegangan sekunder lebih besar dari tegangan primer, maka trafo tersebut dinamakan *step up*. Bila tegangan sekunder lebih kecil dari tegangan primer maka trafo tersebut dinamakan *step down*.



Gambar 2.3 Konstruksi Dasar Transformator

2.2.2. Cara Kerja Transformator

Apabila kumparan primer dihubungkan dengan tegangan AC (sumber), maka akan mengalir arus bolak-balik I_1 pada kumparan tersebut. Oleh karena kumparan mempunyai inti, arus I_1 menimbulkan fluks magnet yang juga berubah-ubah pada intinya. Akibat fluks magnet yang berubah-ubah maka pada kumparan

primer akan timbul GGL induksi e_p . Besarnya GGL induksi pada kumparan primer adalah (Soebagio, 2012):

$$e_p = -N_p \frac{d\phi}{dt} \text{ volt} \quad (2.5)$$

dengan,

e_p = GGL Induksi pada kumparan primer

N_p = Jumlah kumparan kumparan primer

$d\phi$ = perubahan garis-garis magnet dalam satuan weber

(1 weber = 10^8 maxwell)

dt = perubahan waktu dalam satuan detik

Fluks magnet yang menginduksi GGL induksi e_p juga dialami oleh kumparan sekunder karena merupakan fluks bersama (mutual fluks). Dengan demikian fluks tersebut menginduksikan GGL induksi e_s pada kumparan sekunder. Besarnya GGL induksi pada kumparan sekunder adalah:

$$e_s = -N_s \frac{d\phi}{dt} \text{ volt} \quad (2.6)$$

dengan N_s = jumlah kumparan sekunder. Dari persamaan (2.5) dan (2.6) diperoleh perbandingan kumparan berdasarkan perbandingan GGL induksi yaitu:

$$a = \frac{e_p}{e_s} = \frac{N_p}{N_s} \quad (2.7)$$

a = adalah nilai perbandingan kumparan transformator (turn ratio)

Apabila, $a < 1$, maka transformator berfungsi untuk menaikkan tegangan (*step up transformer*)

$a > 1$, maka transformator berfungsi untuk menurunkan tegangan (*step down transformer*)

2.2.3. Transformator Tiga Fasa

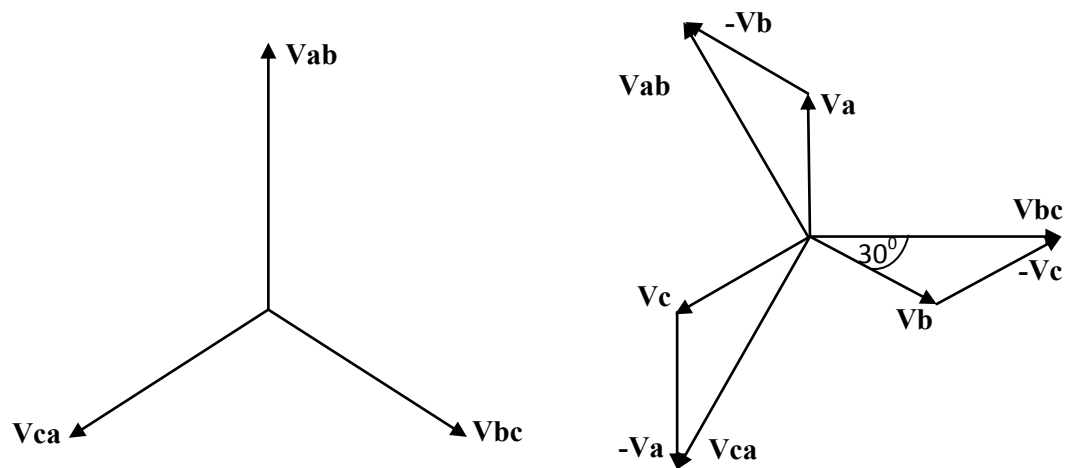
Transformator tiga fasa secara umum terdiri dari tiga buah transformator satu fasa yang dipasang pada satu inti. Baik kumparan primer ataupun sekunder dari transformator tiga fasa dapat dihubungkan (Soebagio, 2012):

1. Secara bintang

2. Secara delta atau segitiga
3. Zig-zag

2.2.3.1. Hubungan Bintang

Hubungan bintang adalah hubungan transformator tiga fasa dengan ujung-ujung awal atau akhir kumparan disatukan. Titik tempat penyatuan dari ujung-ujung lilitan merupakan titik netral. Arus transformator tiga fasa dengan kumparan yang dihubungkan secara bintang yaitu I_A , I_B , I_C , masing-masing berbeda fasa 120° (Soebagio, 2012).



Gambar 2.4 Diagram Fasor dari Trafo Tiga-Fasa dalam Hubungan Y

Berdasarkan gambar 2.4 tegangan antara dua titik awal dari fasa disebut tegangan *line* (Soebagio, 2012):

$$V_{ab} = V_a - V_b \quad (2.8)$$

$$V_{bc} = V_b - V_c \quad (2.9)$$

$$V_{ca} = V_c - V_a \quad (2.10)$$

Dari gambar diperoleh $|V_b| = V$ dan sudut antara $V_{bc} = V_b$ adalah 30° . Karena itu $|V_{cb}| = OA = 2 \cdot OB = 2 \cdot OC \sin 30^\circ = \sqrt{3}V$, bila $V_{line} = V_{bc}$ dan $V_{fasa} = V_b$

$$V_{line} = \sqrt{3}V_{fasa} \quad (2.11)$$

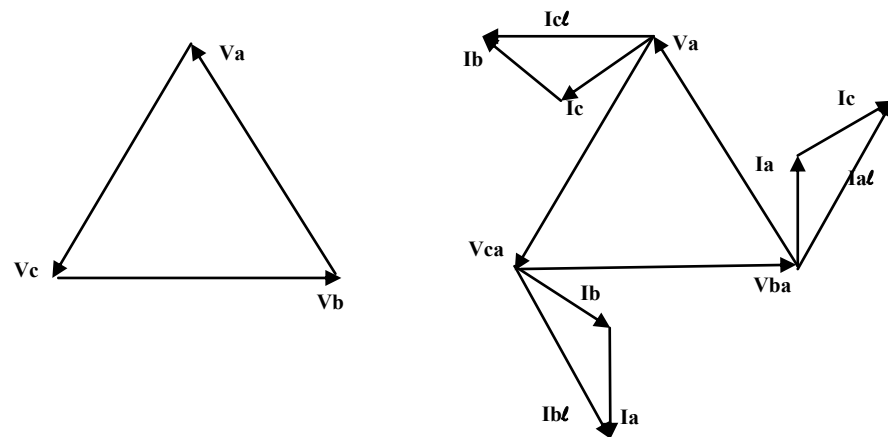
Dalam hubungan ini arus *line* sama dengan arus fasa, sehingga dapat dituliskan sebagai berikut:

$$I_{line} = I_{fasa} \quad (2.12)$$

2.2.3.2. Hubungan Delta atau Segitiga

Hubungan segitiga ialah suatu hubungan transformator tiga fasa dengan cara penyambungan ujung akhir kumparan fasa pertama disambungkan dengan ujung mula kumparan fasa kedua, ujung akhir kumparan fasa kedua disambungkan dengan ujung mula kumparan fasa ketiga. Ujung akhir kumparan fasa ketiga disambungkan dengan ujung mula kumparan fasa pertama.

Tegangan transformator tiga fasa dengan kumparan yang dihubungkan secara delta yaitu V_{AB} , V_{BC} , V_{CA} , masing-masing berbeda fasa 120° . Dalam hal ini tegangan *line* sama dengan tegangan fasa (Soebagio, 2012).



Gambar 2.5 Diagram Fasor Trafo Tiga Fasa dalam Hubungan Δ

Berdasarkan gambar 2.5 I_{al} , I_{bl} , dan I_{cl} adalah berturut-turut arus sesaat dalam jala-jala dari fasa a, b, dan c. Berdasarkan diagram fasor diatas maka diperoleh (Soebagio, 2012):

$$I_{al} = I_a - I_c \quad (2.13)$$

$$I_{bl} = I_b - I_a \quad (2.14)$$

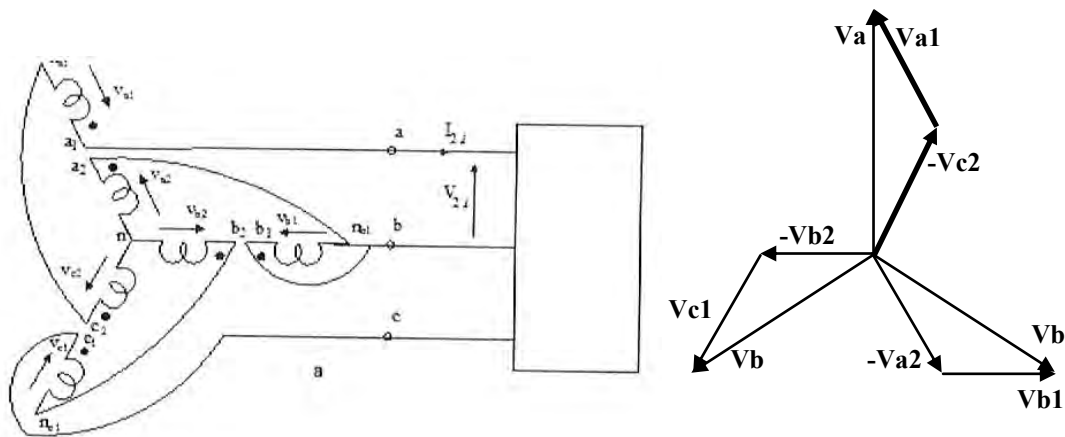
$$I_{cl} = I_c - I_b \quad (2.15)$$

Maka dapat dituliskan hubungan antara arus *line* dan arus fasa yaitu sebagai berikut :

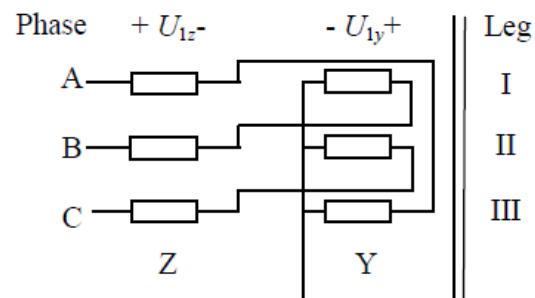
$$I_{line} = \sqrt{3} I_{fasa} \quad (2.16)$$

2.2.3.3. Hubungan Zig-zag

Masing-masing kumparan tiga fasa pada sisi tegangan rendah dibagi menjadi dua bagian dan masing-masing dihubungkan pada kaki yang berlainan.



Gambar 2.6 Hubungan Zig-Zag



Gambar 2.7 Hubungan Kumparan Transformator Tiga Fasa dengan Zig-Zag Winding Basic

Berdasarkan diagram fasor pada gambar 2.6 maka dapat dituliskan persamaan sebagai berikut ini (Soebagio, 2012):

$$V_a = V_{a1} - V_{c2} \quad (2.17)$$

$$V_b = V_{b1} - V_{a2} \quad (2.18)$$

$$V_c = V_{c1} - V_{b2} \quad (2.19)$$

Bila kumparan fasa dibagi menjadi dua sama, dan bila $V_{a1}=V$, maka berdasarkan diagram fasor pada gambar 2.6 dapat dituliskan sebagai berikut:

$$V_a = \sqrt{3}V_{a1} \quad (2.2)$$

2.3. Transformator Penggeser Fasa untuk Mereduksi Harmonisa

Transformator penggeser fasa adalah transformator yang memanfaatkan kelompok hubungan untuk menghasilkan perbedaan fasa. Beberapa patokan dalam menentukan kelompok hubungan adalah :

Notasi untuk hubungan delta, bintang dan hubungan zig-zag, masing-masing adalah D, Y, Z untuk sisi tegangan tinggi dan d, y, z untuk sisi tegangan rendah. Untuk urutan fasa, dipakai notasi U, V, W untuk tegangan tinggi dan u, v, w untuk tegangan rendah. Tegangan primer dianggap sebagai tegangan tinggi dan tegangan sekunder sebagai tegangan rendah.

Angka jam menyatakan bagaimana letak sisi kumparan tegangan tinggi terhadap sisi tegangan rendah. Jarum jam panjang dibuat selalu menunjuk angka 12 dan dibuat berhimpit (dicocokkan) dengan vektor fasa V_L tegangan tinggi *line to line*. Bergantung pada perbedaan fasanya, vektor fasa tegangan rendah (u,v,w) dapat dilukiskan; letak vektor fasa V_1 tegangan rendah *line to line* menunjukkan arah jarum jam pendek.

Tabel 2.5 Kelompok Hubungan Menurut V D E 0532

Angka jam	Kelompok hubungan	TT Tegangan Tinggi	tr Tegangan Rendah	Hubungan Lilitan TT	Hubungan Lilitan tr	Perbandingan Lilitan H
0	Dd0					$\frac{N1}{N2}$
	Yy0					$\frac{N1}{N2}$
	Dz0					$\frac{2N1}{3N2}$
5	Dy5					$\frac{N1}{\sqrt{3}N2}$
	Yd5					$\frac{\sqrt{3}N1}{N2}$
	Yz5					$\frac{2N1}{\sqrt{3}N2}$
6	Dd6					$\frac{N1}{N2}$
	Yy6					$\frac{N1}{N2}$
	Dz6					$\frac{2N1}{3N2}$
11	Dy11					$\frac{N1}{\sqrt{3}N2}$
	Yd11					$\frac{\sqrt{3}N1}{N2}$
	Yz11					$\frac{2N1}{\sqrt{3}N2}$

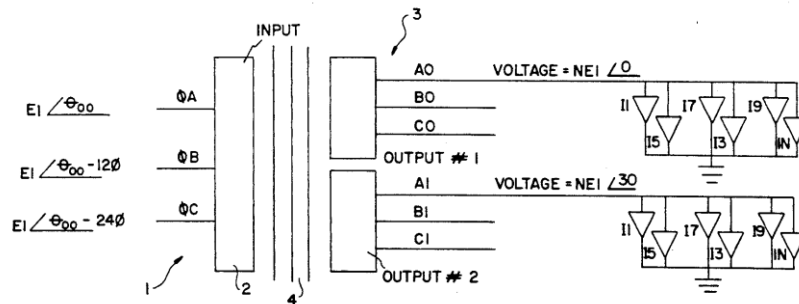
Tabel di atas menunjukkan kelompok hubungan yang sering digunakan yaitu:

1. Pergeseran fasa sejauh 0° dengan kelompok hubungan Dd0, Yy0, dan Dz0.
2. Pergeseran fasa sejauh 180° dengan kelompok hubungan Dd6, Yy6, dan Dz6.
3. Pergeseran fasa sejauh 150° dengan kelompok hubungan Dy5, Yd5, Yz5.
4. Pergeseran fasa sejauh 30° dengan kelompok hubungan Dy11, Yd11, Yz11.

Berkaitan dengan kelompok hubungan transformator dan kebutuhan untuk menurunkan harmonisa, maka dikembangkanlah suatu metode transformator penggeser fasa yang mengakibatkan harmonisa di sisi primer transformator turun hingga mendekati nol akibat superposisi orde harmonisa disisi beban yang berbeda sudut fasa.

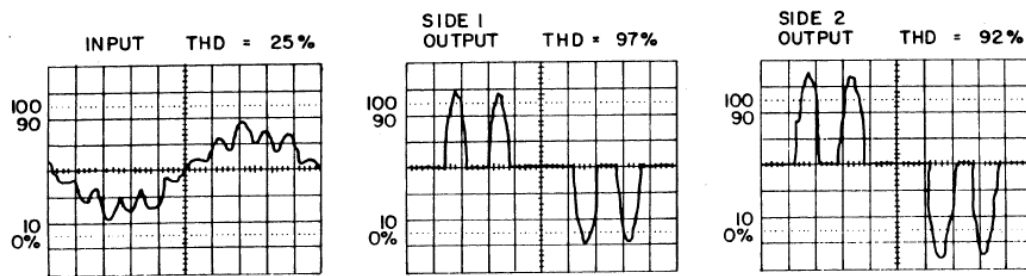
Philip J. A. Ling,dkk, menyatakan bahwa “dengan konfigurasi Y- Δ maka akan terjadi pergeseran fasa sebesar 30^0 pada salah satu lengan beban, yang menyebabkan superposisi arus harmonisa sehingga harmonisa orde ke 5 dan ke 7 dari cabang beban dapat saling meniadakan. Cara tersebut dapat digunakan untuk mengurangi dampak harmonisa yang disebabkan oleh beban *non linier* pada sistem kelistrikan.”

Untuk meminimalkan harmonisa yang terjadi, maka dilakukan beberapa modifikasi pada kumparan sekunder. Kumparan sekunder transformator berupa *output 1* dan *output 2* yang dihubungkan dengan beban *non linier* pada masing-masing *output*. Harmonisa orde tertentu saling menghilangkan akibat pergeseran fasa sejauh 30^0 pada salah satu lengan beban.



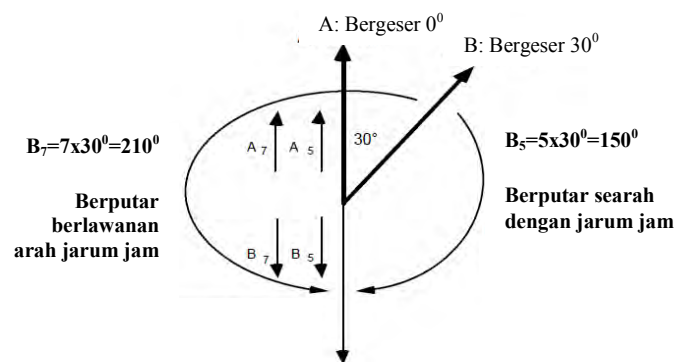
Gambar 2.8 Transformator Pergeseran Fasa dengan Dua *Output* di Sisi Sekunder.

Gambar 2.9 merupakan hasil percobaan dari transformator penggeser fasa dengan dua *output* di sisi sekunder. *Output 1* memiliki nilai THD sebesar 97% dan *output 2* memiliki nilai THD sebesar 92%. Perbedaan sudut sejauh 30^0 antar *output* menyebabkan harmonisa orde tertentu saling menghilangkan sehingga mengurangi harmonisa pada sisi primer transformator yaitu THD menjadi sebesar 25%.



Gambar 2.9 Perubahan Bentuk Gelombang pada Sisi Primer setelah Dilakukan Pergeseran Fasa Pada Kumparan Sekunder Transformator

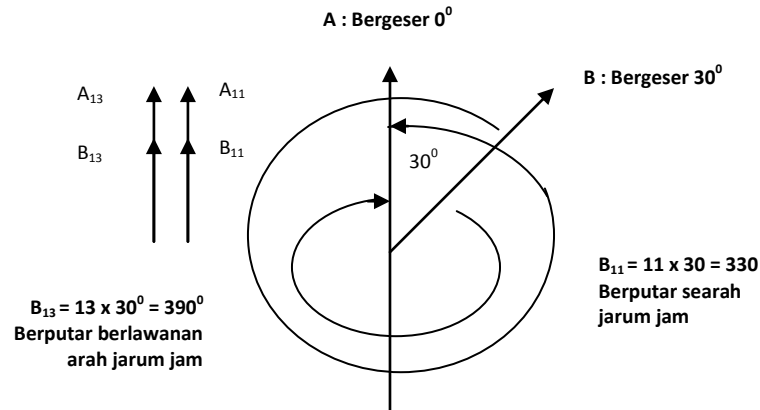
Berikut adalah superposisi komponen harmonisa arus ke 5 dan 7 dengan perbedaan sudut fasa 30^0 .



Gambar 2.10. Pergeseran Fasa 30^0 Menghilangkan Harmonisa Arus ke 5 dan ke 7. (Philip J.A. Ling, dkk, 2004)

Gambar 2.10 menunjukkan bahwa vektor A tidak bergeser dengan arah ke atas sedangkan vektor B bergeser sebesar 30^0 . Harmonisa arus ke 5 memiliki pergeseran sudut sebesar $5 \times 30^0 = 150^0$, karena harmonisa arus ke 5 merupakan urutan negatif maka arah vektor B bergeser sebesar 150^0 ke kanan dan arah vektor ke bawah. Resultan vektor A_5 dan B_5 saling meniadakan sehingga harmonisa arus pada orde ke 5 pada sisi primer hilang. Begitu pula halnya dengan harmonisa arus ke 7 yang berarti memiliki pergeseran sudut $7 \times 30^0 = 210^0$, karena harmonisa arus ke 7 merupakan urutan fasa positif, maka arah vektor B bergeser sebesar 210^0 ke kiri sehingga arah vektor ke bawah. Resultannya ialah vektor A_7 dan B_7 saling

meniadakan sehingga harmonisa arus orde ke 7 pada sisi primer hilang. Transformator penggeser fasa dengan dua *output* di sisi sekunder dapat meniadakan harmonisa 3-9 dan muncul kembali pada orde 11 dan 13 karena menghasilkan vektor sebagai berikut :



Gambar 2.11 Analisa Vektor pada Harmonisa ke 11 dan ke 13 dengan Pergeseran Fasa Sejauh 30° . (Philip J.A. Ling, dkk, 2004)

Gambar 2.11 menunjukkan vektor A tidak bergeser dengan arah vektor ke atas sedangkan vektor B bergeser sebesar 30° . Harmonisa arus ke 11 memiliki pergeseran sudut sebesar $11 \times 30^\circ = 330^\circ$ karena harmonisa arus ke 11 merupakan urutan negatif maka arah vektor B bergeser sebesar 330° ke kanan dan arah vektor ke atas. Resultannya ialah vektor A_{11} dan B_{11} saling menjumlahkan sehingga harmonisa arus orde ke 11 tetap muncul di sisi primer transformator. Harmonisa arus ke 13 memiliki pergeseran sudut sebesar $13 \times 30^\circ = 390^\circ$ dan karena harmonisa arus ke 13 merupakan urutan positif maka arah vektor B bergeser sebesar 390° ke kiri dan arah vektor ke atas. Resultannya ialah vektor A_{13} dan B_{13} saling menjumlahkan, sehingga harmonisa arus orde ke 13 tetap muncul di sisi primer transformator.

2.3.1. Transformator Penggeser Fasa *Multi Winding*

Untuk mengurangi harmonisa pada orde yang lebih tinggi maka digunakan lebih banyak *output*. Hal ini diperjelas dalam karyanya *Transformer With Cancellation Of Harmonic Current By Phase Shited Secondary Windings* (John B.

Kammeter, dkk, 1991) menyatakan perbedaan sudut fasa sebesar 20^0 untuk transformator dengan tiga *output* di sisi sekunder dapat mengurangi harmonisa orde ke 3, 5, 7, 9, 11, 13, 15 dan harmonisa muncul kembali pada orde ke 17 dan 19.

Berikut pada tabel 2.6 merupakan rincian harmonisa di sisi primer transformator penggeser fasa dengan perbedaan sudut antar *output* sebesar 20^0 . Pada tabel 2.6 kolom *primer side* nilai 0 (nol) menunjukkan harmonisa yang saling meniadakan akibat perbedaan sudut antar *output* transformator, nilai 1 (satu) menunjukkan harmonisa tetap muncul atau saling menjumlahkan, sedangkan (-) menunjukkan triplen harmonik yang terperangkap akibat rangkaian delta pada sisi primer transformator.

Perbedaan sudut antar fasa pada tiga atau lebih *output* dapat menghasilkan gelombang yang semakin mendekati sinusoidal akibat semakin banyak arus harmonisa yang saling meniadakan. Pada penelitian ini untuk memperoleh pergeseran fasa sejauh 20^0 akan dipergunakan koneksi zig-zag yang dapat diatur besar sudut pergeseran sesuai kebutuhan.

Tabel 2.6 Hasil Pengurangan Harmonisa dengan Sudut Pergeseran 20°

O1=20°								
O2=40°								
O3=60°								
Orde h/ Urutan h		Output 1		Output 2		Output 3		Primer Side
		Harmonik Phase Shifting	Reflected Input Current Shift	Harmonik Phase Shifting	Reflected Input Current Shift	Harmonik Phase Shifting	Reflected Input Current Shift	
1	+	-20	0	40	0	60	0	1
3	0	-	-	-	-	-	-	0
5	-	100	120	200	240	300	360	0
7	+	-140	120	280	240	-420	360	0
9	0	-	-	-	-	-	-	0
11	-	220	240	-440	480	660	720	0
13	+	-260	240	520	480	-780	720	0
15	0	-	-	-	-	-	-	0
17	-	340	360	-680	720	1020	1080	1
19	+	-380	360	760	720	-1140	1080	1
21	0	-	-	-	-	-	-	0
23	-	460	480	-920	960	1380	1440	0
25	+	-500	480	1000	960	-1500	1440	0
27	0	-	-	-	-	-	-	0
29	-	580	600	-1160	1200	1740	1800	0
31	+	-620	600	1240	1200	-1860	1800	0
33	0	-	-	-	-	-	-	0
35	-	700	720	-1400	1440	2100	2160	1
37	+	-740	720	1480	1440	-2220	2160	1
39	0	-	-	-	-	-	-	0
41	-	820	840	-1640	1680	2460	2520	0
43	+	-860	840	1720	1680	-2580	2520	0
45	0	-	-	-	-	-	-	0
47	-	940	960	-1880	1920	2820	2880	0
49	+	-980	960	1960	1920	-2940	2880	0
51	0	-	-	-	-	-	-	0
53	-	1060	1080	-2120	2160	3180	3240	1
55	+	-1100	1080	2200	2160	-3300	3240	1

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB 3

ALIRAN DAYA HARMONISA DENGAN IMPLEMENTASI PEMODELAN TRANSFORMATOR DAN MITIGASI HARMONISA MENGGUNAKAN TRANSFORMATOR PENGGESER FASA

Penelitian ini akan dibagi menjadi tiga bagian besar yaitu sebagai berikut :

1. Aliran daya harmonisa dengan implementasi transformator pada sistem distribusi radial menggunakan metode *backward-forward sweep*. Perhitungan aliran daya harmonisa akan dibuat dalam bentuk program yang dibagi menjadi dua keadaan yaitu:
 - a. Beban tiga fasa seimbang
 - b. Beban tiga fasa tidak seimbang
2. Hasil pada poin 1 akan divalidasi dengan menggunakan *software* ETAP.
3. Implementasi transformator penggeser fasa dengan koneksi zig-zag pada sistem distribusi radial untuk mengurangi *Total Harmonic Distortion* pada sistem.

3.1. Data Sistem Distribusi Radial 20kV

Terdapat tiga daerah distribusi PLN, yaitu Surabaya Utara, Surabaya Barat, dan Surabaya Selatan yang merupakan jaringan radial. Pada penelitian ini akan menggunakan salah satu penyulang dari sistem distribusi 20 kV Surabaya Utara yaitu Penyulang Kaliasin.

Dalam penelitian ini akan dimodelkan 5 buah transformator sesuai dengan kapasitasnya dan disetiap sisi sekunder transformator akan terhubung dengan bus yang dibebani beban *non linear*. Aliran daya harmonisa dilakukan dalam dua keadaan yaitu beban seimbang dan beban tidak seimbang.

Penyulang Kaliasin terdiri dari 10 bus gardu distribusi dengan 5 beban. Kaliasin yang terdiri dari impedansi saluran dan panjang antar saluran terdapat pada tabel 3.1.

Tabel 3.1 Data Saluran Penyulang Kaliasin

Saluran		Impedansi		Panjang (m)
Bus	Bus	R (ohm)	X (ohm)	
1	2	0,2650000	0,130000	1000
2	3	0,0053000	0,002600	20
2	4	0,0662500	0,032500	250
4	5	0,0103350	0,005070	39
4	6	0,0105470	0,005174	39,8
4	7	0,0137694	0,006755	51,96
7	8	0,0609500	0,029900	230
7	9	0,0140450	0,006890	53
9	10	0,0530000	0,026000	200

Tabel 3.2 Data Beban Penyulang Kaliasin

Bus	Daya					
	P (kW)			Q (kVAR)		
	R-N	S-N	T-N	R-N	S-N	T-N
1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
3	19,99	29,10	24,58	4,06	7,29	7,17
4	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5	11,74	22,89	22,99	2,94	7,19	7,88
6	22,89	23,49	47,99	5,32	6,94	14,73
7	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
8	22,37	24,27	16,93	4,88	8,15	4,02
9	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
10	109,00	98,00	106,00	27,23	19,90	26,50

Tabel 3.3 Data Transformator Penyulang Kaliasin

No	Lokasi	Hubungan Belitan	Ratio (kV)	Daya (kVA)	X/R (%)	Z (%)
1	bus 3	$\Delta - Y_g$	20/0,38	160	3,09	6,75
2	bus 5	$\Delta - Y_g$	20/0,38	150	2,47	6,75
3	bus 6	$\Delta - Y_g$	20/0,38	250	3,09	6,75
4	bus 8	$\Delta - Y_g$	20/0,38	150	2,47	6,75
5	bus 10	$\Delta - Y_g$	20/0,38	1110	7,10	6,75

Setiap transformator mempunyai kapasitas daya yang berbeda-beda tergantung dari besar bebannya. Hubungan belitan transformator yang digunakan adalah hubungan delta (Δ) dan hubungan Y_g (Y yang diketanahkan).

3.2. Aliran Daya Harmonisa dengan Metode *Backward-Forward Sweep*

Perhitungan aliran daya harmonisa dengan metode *backward-forward sweep* akan dilakukan dengan tahap sebagai berikut:

1. Aliran daya dengan implementasi transformator pada sistem distribusi radial.
2. Aliran daya harmonisa yang diproses berdasarkan nilai tegangan dan arus bus fundamental pada tahapan 1.

3.2.1. Aliran Daya dengan Implementasi Transformator pada Sistem Distribusi Radial

Perhitungan aliran daya dengan implementasi transformator dilakukan berdasarkan tahapan berikut :

3.2.1.1. *Backward Sweep*

Pada tahapan *backward sweep* akan diasumsikan tegangan pada bagian akhir bus sebesar 1 pu, sehingga nilai arus di sisi sekunder transformator dapat dihitung.

1. Perhitungan arus beban atau arus sekunder transformator pada bus ke-i dan iterasi ke-k dapat menggunakan persamaan berikut:

$$I_{Li} = \left(\frac{S_{Li}}{V_t} \right)^* \quad (3.1)$$

$$I_i = I_{Li+1} + \Sigma \text{aruscabang}$$

2. Implementasi Transformator pada Aliran Daya Radial

Tahap selanjutnya adalah mengimplementasikan model transformator kedalam aliran daya untuk menghitung nilai V_{primer} dan I_{primer} . Pemodelan transformator ini digunakan untuk memperoleh nilai admitansi trafo. Nilai admitansi trafo diperoleh dari matrik Y_t sebagai berikut :

$$[Y_t] = \begin{bmatrix} Y_{pp} & Y_{ps} \\ Y_{sp} & Y_{ss} \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

dengan;

Y_{pp} = admintansi belitan primer – primer

Y_{ss} = admintansi belitan sekunder – sekunder

Y_{ps} = admintansi belitan primer – sekunder

Y_{sp} = admintansi belitan sekunder – primer

Tabel 3.4 Submatrik Y_t untuk Transformator *Step-Down*

Hubungan Belitan		Admitansi Sendiri		Admitansi Bersama	
Primer	Sekunder	Y_{pp}	Y_{ss}	Y_{ps}	Y_{sp}
Y_g	Y_g	Y_I	Y_I	$-Y_I$	$-Y_I$
Y_g	Y	Y_{II}	Y_{II}	$-Y_{II}$	$-Y_{II}$
Y_g	Δ	Y_I	Y_{II}	Y_{III}	Y_{III}^T
Y	Y_g	Y_{II}	Y_{II}	$-Y_{II}$	$-Y_{II}$
Y	Y	Y_{II}	Y_{II}	$-Y_{II}$	$-Y_{II}$
Y	Δ	Y_{II}	Y_{II}	Y_{III}	Y_{III}^T
Δ	Y_g	Y_{II}	Y_I	Y_{III}	Y_{III}^T
Δ	Y	Y_{II}	Y_{II}	Y_{III}	Y_{III}^T
Δ	Δ	Y_{II}	Y_{II}	$-Y_{II}$	$-Y_{II}$

Y_g = Belitan transformator hubungan Y yang diketanahkan

Y = Belitan transformator hubungan Y

Δ = Belitan transformator hubungan Δ

Nilai Y_I , Y_{II} dan Y_{III} didapatkan dari persamaan matrik berikut ini :

$$[Y_I] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} y_t \quad (3.3)$$

$$[Y_{II}] = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} y_t \quad (3.4)$$

$$[Y_{III}] = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} -1 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 1 \\ 1 & 0 & -1 \end{bmatrix} y_t \quad (3.5)$$

$$[Y_{III}^T] = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \end{bmatrix} y_t \quad (3.6)$$

dimana y_t merupakan admitansi transformator dalam per unit (pu).

Nilai admintasi trafo dapat diperoleh dari nilai impedansi trafo. Impedansi transformator umumnya ditulis dalam bentuk persen (%) pada *nameplate*. Maka dapat diperoleh sebagai berikut :

$$perunit = \frac{percent_value}{100} \quad (3.7)$$

Dari persamaan (3.7) akan diperoleh Z transformator dalam satuan per-unit. Nilai Z akan diinvers sehingga diperoleh nilai y_t , sebagai berikut:

$$y_t = (Z_t)^{-1} \quad (3.8)$$

Matrik Y_t pada persamaan (3.2) dapat digunakan untuk menghitung nilai arus dan tegangan pada sisi primer dan sekunder transformator. Seperti ditunjukkan pada persamaan matrik berikut ini :

$$\begin{bmatrix} I_p \\ I_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{pp} & Y_{ps} \\ Y_{sp} & Y_{ss} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_p \\ V_s \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

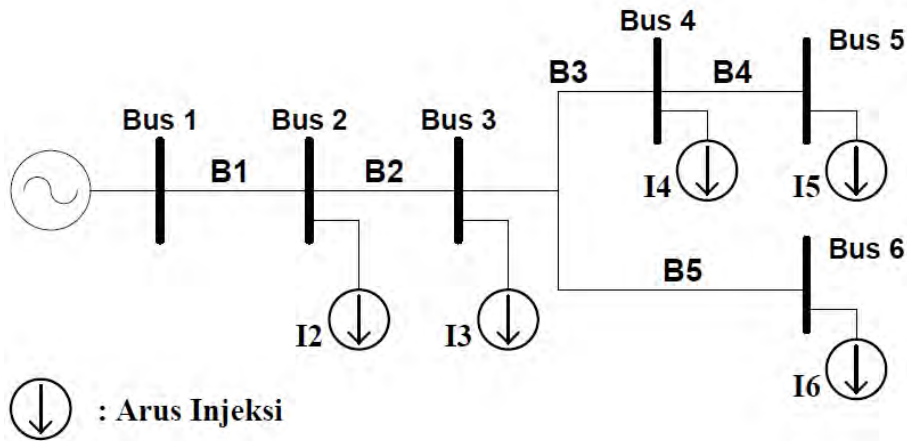
Setelah diperoleh nilai arus di sisi sekunder transformator dengan persamaan (3.1), aliran daya metode *backward* dilanjutkan dengan melakukan perhitungan untuk mendapatkan nilai tegangan primer (V_p) dan arus primer (I_p) menggunakan persamaan berikut:

$$V_P = Y_{SP}^{-1}(I_S - Y_{SS}V_S) \quad (3.10)$$

$$I_P = Y_{PP}V_P + Y_{PS}V_S \quad (3.11)$$

3. Network Topology

Setelah diperoleh nilai V_p dan I_p trafo, maka perhitungan aliran daya dapat dilanjutkan dengan membentuk dua buah matrik berdasarkan metode *network topology*. Metode ini dipergunakan untuk persamaan aliran daya yang didasarkan pada dua buah matrik yaitu BIBC (*Bus Injection to Branch Current*) dan BCBV (*Branch Current to Bus Voltage*). Salah satu contoh pembentukan persamaan aliran daya adalah sebagai berikut :



Gambar 3.2 *Single Line Diagram* dengan Metode *Network Topology*

Gambar 3.2 merepresentasikan sebuah sistem distribusi dengan model rangkaian radial murni. Pada sistem ini beban yang tersebar dalam jalur tertentu disuplai dari sebuah sumber pada *infinite bus*. Maka diperoleh persamaan injeksi arus sederhana sebagai berikut:

$$B_5 = I_6$$

$$B_4 = I_5$$

$$B_3 = I_4 + I_5$$

$$B_2 = I_3 + I_4 + I_5 + I_6$$

$$B_1 = I_2 + I_3 + I_4 + I_5 + I_6$$

Persamaan injeksi arus ini dapat dituliskan dalam bentuk matrik BIBC (*Bus Injection to Branch Current*) :

$$\begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ B_3 \\ B_4 \\ B_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_2 \\ I_3 \\ I_4 \\ I_5 \\ I_6 \end{bmatrix}$$

$$[B] = [\mathbf{BIBC}][I] \quad (3.12)$$

Nilai *drop* tegangan berdasarkan jalur injeksi arus dapat dibentuk melalui persamaan sebagai berikut :

$$V_2 = V_1 - B_1 \cdot Z_{12}$$

$$V_3 = V_1 - B_1 \cdot Z_{12} - B_2 \cdot Z_{23}$$

$$V_4 = V_1 - B_1 \cdot Z_{12} - B_2 \cdot Z_{23} - B_3 \cdot Z_{34}$$

$$V_5 = V_1 - B_1 \cdot Z_{12} - B_2 \cdot Z_{23} - B_3 \cdot Z_{34} - B_4 \cdot Z_{45}$$

$$V_6 = V_1 - B_1 \cdot Z_{12} - B_2 \cdot Z_{23} - B_5 \cdot Z_{36}$$

Maka *drop* tegangan dapat dituliskan pula sebagai berikut :

$$V_1 - V_2 = B_1 \cdot Z_{12}$$

$$V_1 - V_3 = B_1 \cdot Z_{12} + B_2 \cdot Z_{23}$$

$$V_1 - V_4 = B_1 \cdot Z_{12} + B_2 \cdot Z_{23} + B_3 \cdot Z_{34}$$

$$V_1 - V_5 = B_1 \cdot Z_{12} + B_2 \cdot Z_{23} + B_3 \cdot Z_{34} + B_4 \cdot Z_{45}$$

$$V_1 - V_6 = B_1 \cdot Z_{12} + B_2 \cdot Z_{23} + B_5 \cdot Z_{36}$$

Persamaan di atas dapat ditulis dalam bentuk matrik BCBV (*Branch Current to Branch Voltage*) yaitu sebagai berikut :

$$\begin{bmatrix} V_1 - V_2 \\ V_1 - V_3 \\ V_1 - V_4 \\ V_1 - V_5 \\ V_1 - V_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ Z_{12} & Z_{23} & 0 & 0 & 0 \\ Z_{12} & Z_{23} & Z_{34} & 0 & 0 \\ Z_{12} & Z_{23} & Z_{34} & Z_{45} & 0 \\ Z_{12} & Z_{23} & 0 & 0 & Z_{36} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ B_3 \\ B_4 \\ B_5 \end{bmatrix}$$

$$[\Delta V] = [\mathbf{BCBV}][B] \quad (3.13)$$

Perhitungan pada tahapan *backward* akan digunakan untuk memperoleh nilai arus yang mengalir pada tiap bus.

3.2.1.2. Forward Sweep

Pada tahap *forward sweep* akan dihitung nilai drop tegangan pada setiap bus, yaitu sebagai berikut :

1. Nilai arus dari perhitungan *backward sweep* akan digunakan untuk mencari nilai *drop* tegangan pada setiap bus. Drop tegangan dapat diperoleh dengan menggunakan matrik BCBV (*Branch Current to Branch Voltage*).
2. Setelah nilai tegangan drop disetiap bus diperoleh (sebelum bus transformator), tahap selanjutnya mencari tegangan primer trafo dengan mengurangi tegangan bus dengan tegangan drop.

$$V^k_i = (V_{i+l})^k - Z^k_i \times I^k_i \quad (3.14)$$

3. Tegangan primer trafo hasil perhitungan tahap ke dua digunakan untuk memperoleh nilai tegangan sekunder transformator dengan persamaan berikut:

$$V_s = Y_{ss}^{-1} (I_s - Y_{sp} V_p) \quad (3.15)$$

Persamaan (3.15) ini diperoleh dari persamaan (3.9).

4. Tegangan sekunder hasil perhitungan tahap ke tiga, akan digunakan kembali dalam iterasi selanjutnya pada metode *backward sweep*.
5. Dengan demikian dapat dihitung daya beban yang diperoleh dari perkalian tegangan dan arus sekunder transformator. Selisih antara daya beban pada iterasi kedua dengan iterasi pertama merupakan *error*. Iterasi akan terus berlanjut hingga *error* yang diperoleh sangat kecil.

3.2.2. Aliran Daya Harmonisa dengan Implementasi Transformator

Setelah proses perhitungan aliran daya sistem distribusi radial dengan metode *backward-forward sweep* maka diperoleh nilai V dan I di setiap bus. Nilai ini akan menjadi tegangan dan arus *fundamental* yang digunakan untuk menghitung nilai THD pada sistem.

1. Menghitung arus injeksi dari beban non linier yang diperoleh dari persamaan berikut :

$$Ih_i^{(h)} = \frac{V_i^{(h)}}{Z_i^{(h)}} \quad (3.16)$$

dengan :

$Ih_i^{(h)}$ = arus injeksi beban non linier pada bus i pada harmonisa orde h

$V_i^{(h)}$ = tegangan harmonisa pada bus i harmonisa orde h

$Z_i^{(h)}$ = impedansi ekivalen dari beban linier pada bus i harmonisa ke h

Vektor $[I^{(h)}]$ akan berukuran $(m+n) \times 1$, m adalah sumber harmonisa dan n adalah beban non linier. Pada penelitian ini, nilai injeksi harmonisa disisi beban telah ditentukan sebagai berikut:

Tabel 3.5 Injeksi Harmonisa pada Beban

Orde	Magnitude(%)	Sudut
5	23,52	111
7	6,08	109
11	4,57	-158
13	4,2	-178
17	1.8	-94
19	1.37	-92

Proses perhitungan arus injeksi dilakukan per orde harmonisa. Nilai injeksi harmonisa pada tabel 3.5 akan dikali dengan $I_{fundamental}$ untuk memperoleh arus yang terdistorsi disetiap bus.

$$[I^5] = \begin{bmatrix} I_{h1fund} \times 0,2352 \angle 111 \\ I_{h2fund} \times 0,2352 \angle 111 \\ I_{h3fund} \times 0,2352 \angle 111 \\ I_{h4fund} \times 0,2352 \angle 111 \\ I_{h5fund} \times 0,2352 \angle 111 \end{bmatrix}$$

$$[I^7] = \begin{bmatrix} I_{h1fund} \times 0,0608 \angle 109 \\ I_{h2fund} \times 0,0608 \angle 109 \\ I_{h3fund} \times 0,0608 \angle 109 \\ I_{h4fund} \times 0,0608 \angle 109 \\ I_{h5fund} \times 0,0608 \angle 109 \end{bmatrix} \text{ dst.}$$

2. Menentukan vektor untuk sistem arus harmonisa yang melalui saluran i dan j. Koefisien vektor berisi 1 jika saluran dilewati arus harmonisa dan berisi 0 jika saluran tidak dilewati arus harmonisa. Koefisien vektor tersebut dapat diformulasikan sebagai berikut:

$$[A_{ij}^{(h),k}] = \begin{bmatrix} Ah_{ij}^{(h),k} \\ \dots \\ \dots \end{bmatrix} \quad (3.17)$$

dimana :

$[A_{ij}^{(h),k}]$ = koefisien vektor arus harmonisa yang melewati saluran

$[Ah_{ij}^{(h),k}]$ = koefisien vektor dari sumber harmonisa dan beban non linear

Pada matrik $[A^{(h)}]$, baris menyatakan jumlah saluran dan kolom menyatakan jumlah dari beban non linier yang ada pada sistem. Sesuai dengan gambar 3.1 pembentukan matrik $[A]$ disisi primer transformator adalah sebagai berikut :

$$[A] = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

3. Selanjutnya menentukan matrik $[HA]$ di sisi primer transformator, pembentukan matrik ini berdasarkan hubungan antara tegangan bus

dengan arus harmonisa yang mengalir. Matrik [HA] yang dibentuk dari hubungan matrik [BCBV] dan matrik [A] akan terbentuk sebagai berikut:

$$\begin{bmatrix} Z_{12} & Z_{12} & Z_{12} & Z_{12} & Z_{12} \\ Z_{12} + Z_{23} & Z_{12} & Z_{12} & Z_{12} & Z_{12} \\ Z_{12} & Z_{12} + Z_{24} & Z_{12} + Z_{24} & Z_{12} + Z_{24} & Z_{12} + Z_{24} \\ Z_{12} & Z_{12} + Z_{24} + Z_{45} & Z_{12} + Z_{24} & Z_{12} + Z_{24} & Z_{12} + Z_{24} \\ Z_{12} & Z_{12} + Z_{24} & Z_{12} + Z_{24} + Z_{46} & Z_{12} + Z_{24} & Z_{12} + Z_{24} \\ Z_{12} & Z_{12} + Z_{24} & Z_{12} + Z_{24} & Z_{12} + Z_{24} + Z_{47} & Z_{12} + Z_{24} + Z_{47} \\ Z_{12} & Z_{12} + Z_{24} & Z_{12} + Z_{24} & Z_{12} + Z_{24} + Z_{47} + Z_{78} & Z_{12} + Z_{24} + Z_{47} \\ Z_{12} & Z_{12} + Z_{24} & Z_{12} + Z_{24} & Z_{12} + Z_{24} + Z_{47} & Z_{12} + Z_{24} + Z_{47} + Z_{79} \\ Z_{12} & Z_{12} + Z_{24} & Z_{12} + Z_{24} & Z_{12} + Z_{24} + Z_{47} & Z_{12} + Z_{24} + Z_{47} + Z_{79} + Z_{910} \end{bmatrix}$$

Jumlah kolom pada matrik [HA] sesuai dengan jumlah beban non linier yang ada pada sistem, sedangkan jumlah baris sesuai dengan jumlah saluran. Matrik [HA] dibentuk dari penjumlahan baris pada matrik [A] yang telah dikali dengan impedansi saluran. Ini menunjukkan impedansi tersebut dilewati dan dipengaruhi arus harmonisa.

Kolom pertama matrik [HA] dibentuk dari kolom pertama matrik [A] yang telah dikali dengan impedansi saluran. Kolom kedua matrik [HA] dibentuk dari penjumlahan kolom pertama dan kolom kedua dari matrik [A] yang telah dikali dengan impedansi. Bila pada sistem distribusi terdapat cabang (perhatikan gambar 3.1), sama seperti kolom ketiga dari matrik [HA], dibentuk dari penjumlahan kolom pertama dan kolom ketiga matrik [A] yang telah dikali impedansi. Begitu pula kolom ke empat dibentuk dari penjumlahan kolom pertama, ketiga dan keempat dari matrik [A], begitu seterusnya hingga bus akhir pada sistem.

Nilai impedansi saluran dalam matrik [HA] merupakan impedansi yang dipengaruhi harmonisa. Impedansi saluran terdiri dari resistansi dan reaktansi. Besar reaktansi induktif pada impedansi saluran dipengaruhi oleh frekuensi, hal ini ditunjukkan oleh persamaan :

$$X_L = 2\pi fL$$

sehingga nilai reaktansi pada orde harmonisa ke h terhadap fundamentalnya dituliskan sebagai berikut (Roger C. Dugan, dkk, 2004) :

$$X_h = hX_1$$

Nilai resistansi sistem diasumsikan tidak berubah secara signifikan terhadap frekuensi, sehingga impedansi saluran yang telah terdistorsi harmonisa dapat dituliskan dengan rumus sebagai berikut:

$$Z = R + hX \quad (3.18)$$

dengan,

R : resistansi saluran

h : orde harmonisa

X : reaktansi saluran

4. Menghitung tegangan harmonisa di setiap bus pada sisi primer transformator menggunakan persamaan berikut:

$$[V^{(h)}] = [HA^{(h)}][I^{(h)}] \quad (3.19)$$

dengan :

$[V^{(h)}]$ = nilai tegangan harmonisa pada orde ke h

Iterasi dilakukan per orde harmonisa hingga diperoleh nilai akhir dengan *error* minimum.

5. Implementasi Transformator

Tegangan harmonisa di sisi sekunder dapat diperoleh dengan menggunakan persamaan (3.14). Nilai V_p merupakan tegangan harmonisa di sisi primer, I_s merupakan arus injeksi harmonisa, Y_{SS}^{-1} dan Y_{SP} mengikuti persamaan (3.3) dan (3.6) dengan nilai Z_t yang mengandung harmonisa yaitu $Z = R + hX$, sehingga invers dari Z_t akan membentuk admitansi trafo yang telah dipengaruhi harmonisa. Sehingga persamaan tegangan harmonisa di sisi sekunder transformator dapat dituliskan sebagai berikut :

$$V_S^h = Y_{SSh}^{-1}(I_S^h - Y_{SPh}V_S^h) \quad (3.20)$$

6. Kriteria yang dipergunakan yaitu :

$$[V_i^{(h),k+1} - V_i^{(h),k}] \leq Error, \quad (3.21)$$

nilai *error* merupakan nilai toleransi yang telah ditentukan untuk tiap tegangan harmonisa pada bus i dan orde harmonisa ke h .

3.3. Mitigasi Harmonisa dengan Mengimplementasikan Transformator Penggeser Fasa pada Sistem Distribusi Radial

Pada penelitian digunakan transformator penggeser fasa dengan tiga *output* di sisi sekunder untuk memitigasi harmonisa pada sistem distribusi Kaliasin.

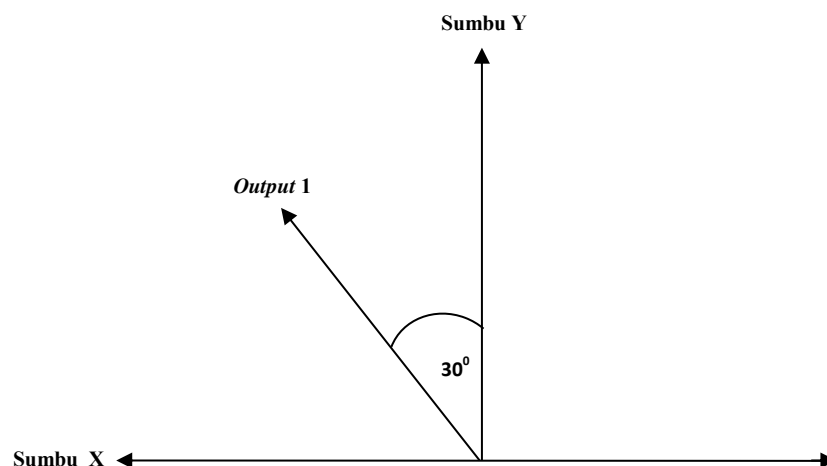
3.3.1. Tiga *Output* di Sisi Sekunder

Transformator penggeser fasa dengan tiga *output* di sisi sekunder dapat menghilangkan harmonisa arus orde 3, 5, 7, 9, 11, 13, dan 15 akibat perbedaan sudut fasa antara *output satu* dengan *output* yang lain sejauh 20° . Perbedaan sudut ini tidak dapat diselesaikan menggunakan koneksi Δ -Y, Y-Y, dan Y- Δ , sehingga diperlukan modifikasi menggunakan koneksi zig-zag.

Pada sisi primer transformator digunakan rangkaian delta dan sisi sekunder menggunakan rangkaian Y dan zig-zag. Beberapa langkah untuk menghasilkan perbedaan sudut antara *output* satu dengan *output* lainnya sejauh 20° yaitu sebagai berikut :

1. *Output* pertama

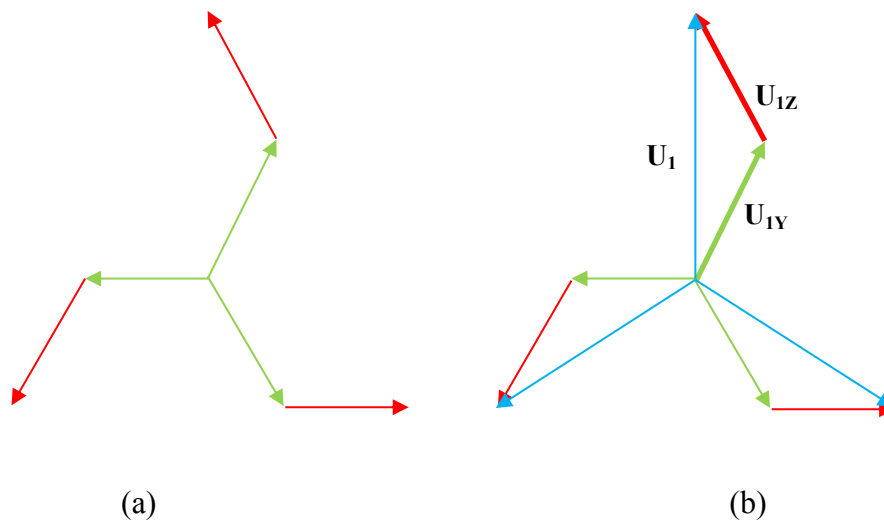
Pada sisi sekunder *output* pertama dirangkai secara Y. Rangkaian Dy11 ini menghasilkan pergeseran fasa sejauh 30° .



Gambar 3.3 Pergeseran Fasa pada *Output* Pertama Sejauh 30°

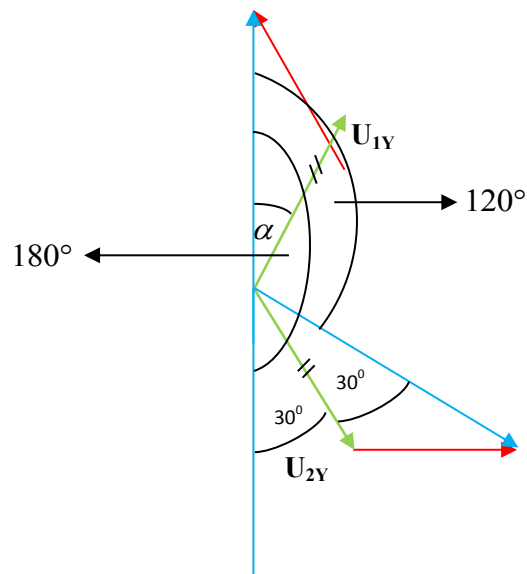
2. *Output* kedua

Agar terjadi perbedaan sudut sejauh 20° dengan *output* lainnya maka sisi sekunder trafo dirangkai zig-zag. Sebelum melakukan modifikasi agar menghasilkan perbedaan sudut sejauh 20° maka terlebih dahulu dipilih kelompok hubungan Dz0 sebagai rangkaian dasar zig-zag pada simulasi kali ini.



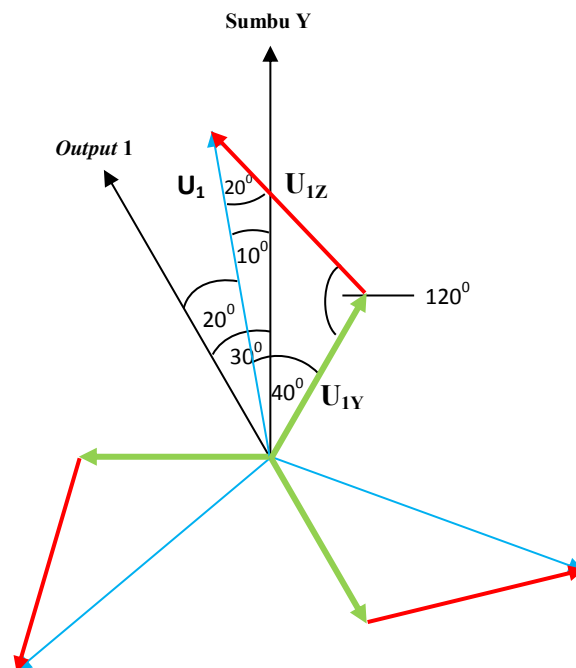
Gambar 3.4 (a) Hubungan Zig-Zag dari Rangkaian Dz0 (b) U_1 Merupakan Resultan dari U_{1Y} Dan U_{1Z}

Gambar 3.4 menunjukkan hubungan zig-zag dari rangkaian Dz0 yang menghasilkan resultan 0° . Gambar 3.4 (b) menunjukkan resultan U_{1Y} dan U_{1Z} adalah U_1 (garis berwarna biru) yang menunjukkan angka jam 0 sehingga pergeseran fasa yang terjadi sejauh 0° .



Gambar 3.6 Nilai Sudut α pada Rangkaian Zig-Zag Posisi 0°

Besar sudut α pada gambar 3.6 sama dengan nilai sudut yang dibentuk oleh U_{2Y} yaitu 30° . Berdasarkan gambar 3.5 dan persamaan (3.22) - (3.24) maka *output* kedua dirancang sebagai berikut :



Gambar 3.7 Perbedaan Sudut Fasa antara *Output* 1 dan U_1 (*Output* 2) Sebesar 20°

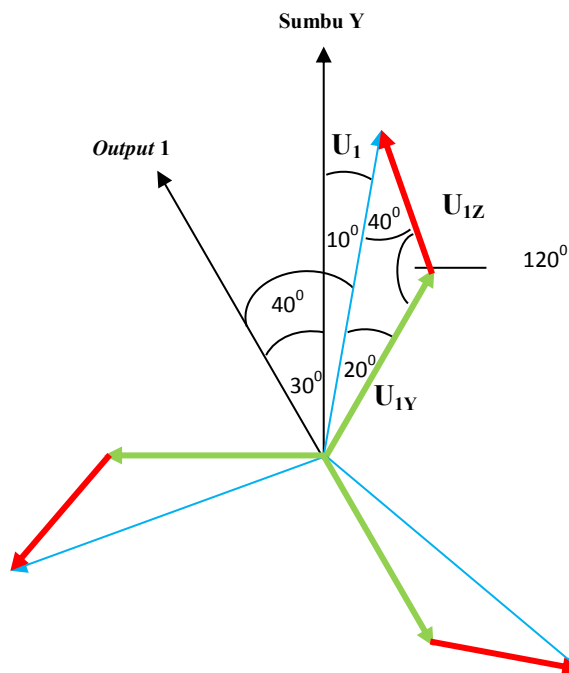
Rangkaian zig-zag pada posisi 0° memiliki nilai α sebesar 30° . Ketika $\alpha = 40^\circ$ perbedaan sudut antara sumbu Y dengan U_1 (*output 2*) sebesar 10° seperti pada gambar 3.7. Karena *output* pertama berada pada posisi 30° maka perbedaan sudut antara *output 1* dan U_1 (*output 2*) menjadi $30^\circ - 10^\circ = 20^\circ$.

Perhitungan untuk besar tiap lengan yaitu sebesar:

$$U_{1z} = \frac{U_1 \sin 40}{\sin 120^\circ} = \frac{\frac{231}{\sqrt{3}} \times \sin 40}{\sin 120} = 98,98929189V$$

$$U_{1y} = \frac{U_1 \sin(60^\circ - \alpha)}{\sin 120^\circ} = \frac{\frac{231}{\sqrt{3}} \times \sin(20)}{\sin 120} = 52,67110207V$$

3. *Output* ketiga



Gambar 3.8 Perbedaan Sudut Fasa antara *Output 1* dan U_1 (*Output 3*) Sebesar 40°

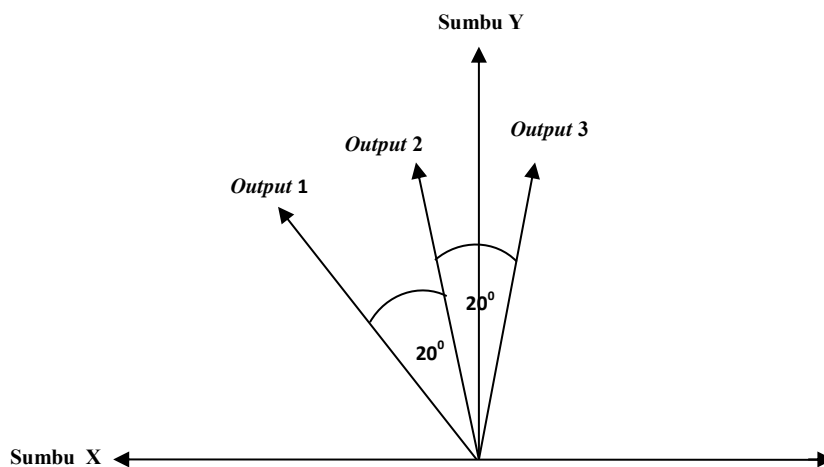
Rangkaian zig-zag pada posisi 0° memiliki nilai α sebesar 30° . Ketika $\alpha = 20^\circ$ perbedaan sudut antara sumbu Y dengan U_1 (*output 3*) sebesar 10° seperti pada gambar 3.8. Karena *output* pertama pada posisi 30° maka perbedaan sudut antara *output 1* dan U_1 (*output 3*) menjadi $30^\circ + 10^\circ = 40^\circ$

Perhitungan untuk besar tiap lengan yaitu sebesar:

$$U_{1Z} = \frac{U_1 \sin 20}{\sin 120^\circ} = \frac{\frac{231}{\sqrt{3}} \times \sin 20}{\sin 120} = 52,67110207V$$

$$U_{1Y} = \frac{U_1 \sin(60^\circ - \alpha)}{\sin 120^\circ} = \frac{\frac{231}{\sqrt{3}} \times \sin(40)}{\sin 120} = 98,98929189V$$

Perbedaan sudut sejauh 20° akan diperoleh bila *output* pertama, *output* kedua, dan *output* ketiga digabungkan.



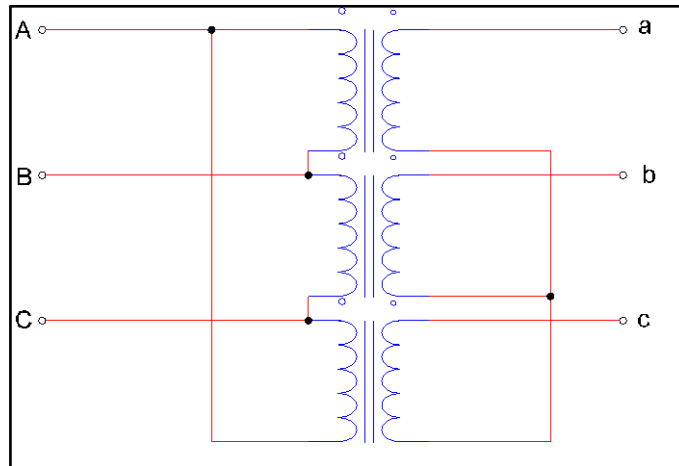
Gambar 3.9 Perbedaan Sudut Fasa Sebesar 20° antara *Output 1*, *Output 2*, dan *Output 3*

3.3.2. Rangkaian Transformator Penggeser Fasa Tiga *Output* di Sisi Sekunder

Berikut ini adalah rangkaian transformator penggeser fasa dengan tiga *output* di sisi sekunder.

1. Sisi Primer

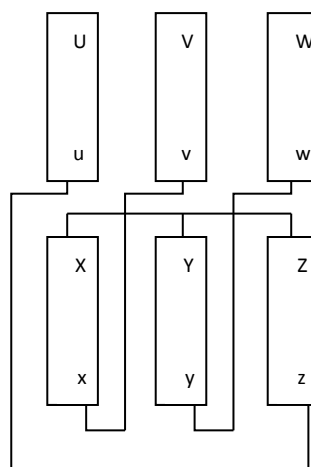
Sisi primer transformator menggunakan rangkaian delta seperti yang ditunjukkan pada gambar 3.10.



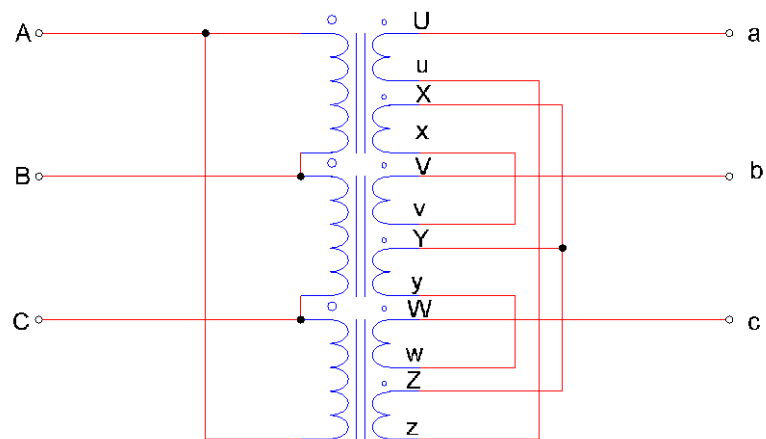
Gambar 3.10 Rangkaian Delta pada Sisi Primer Trafo dan Rangkaian Y pada Sisi Sekunder Trafo

2. Sisi Sekunder

Sisi sekunder trafo akan dirangkai secara Y dan zig-zag. Bentuk rangkaian Y ditunjukkan pada gambar 3.10 di sisi sekunder transformator. Rangkaian Zig-zag ditunjukkan pada gambar 3.11 berikut ini:



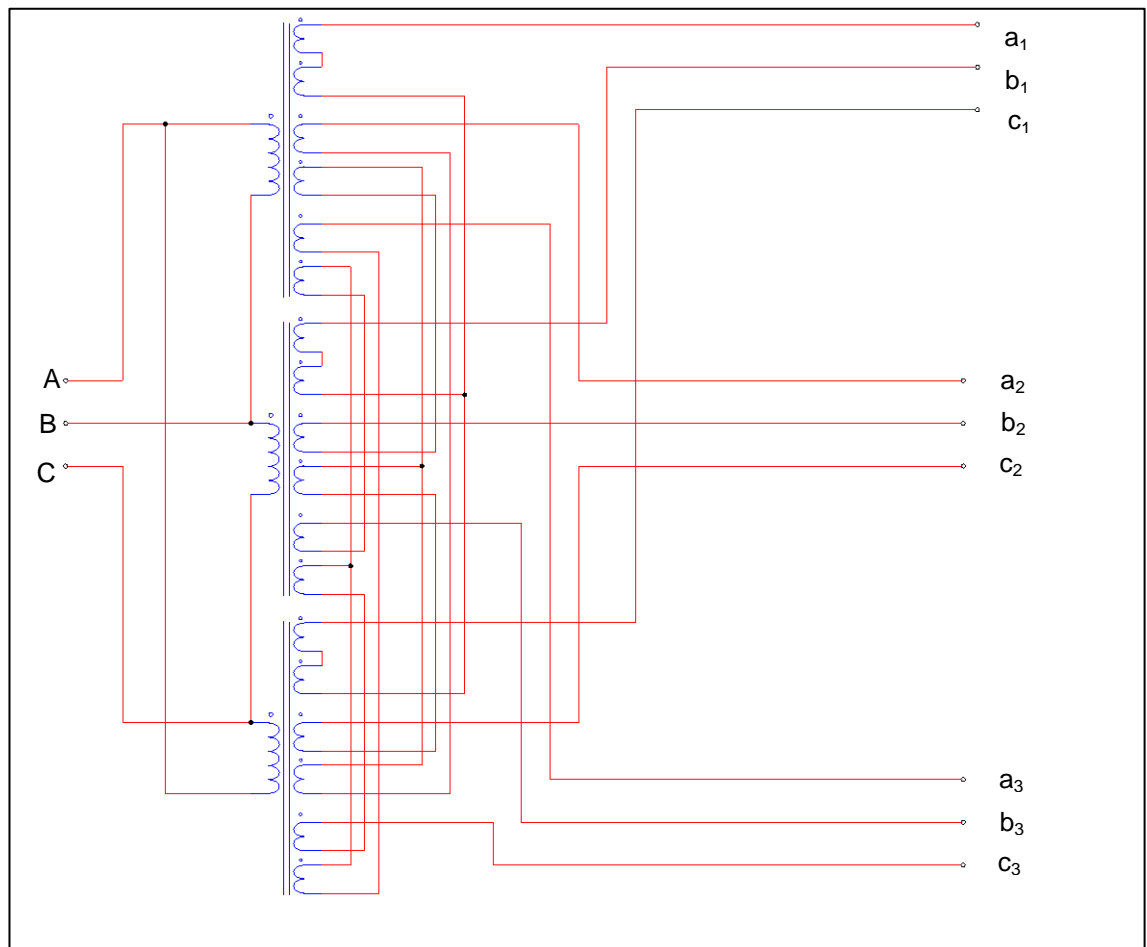
(a) Hubungan Kumparan dengan Rangkaian Zig-Zag



(b) Rangkaian Zig-Zag pada Sisi Sekunder Transformator

Gambar 3.11 (a) Hubungan Kumparan dengan Rangkaian Zig-Zag (b)
Rangkaian Zig-Zag pada Sisi Sekunder Transformator

Gambar 3.10-3.11 merupakan rangkaian sederhana yang menunjukkan koneksi trafo pada transformator penggeser fasa. Berikut merupakan gambar transformator penggeseser fasa dengan tiga *output* di sisi sekunder secara lengkap:



Gambar 3.12 Transformator Penggeser Fasa dengan Tiga *Output* di Sisi Sekunder

Pada gambar 3.12 sisi primer transformator menggunakan koneksi delta, dan sisi sekunder trafo terdapat 3 *output* yang masing masing menggunakan koneksi Y dan zig-zag.

3.3.3. Transformator Penggeser Fasa Mereduksi Harmonisa Pada Sistem Distribusi Radial

Transformator ini akan di implementasikan dalam sistem distribusi radial kaliasin Surabaya. Setelah melakukan perhitungan dan merancang desain transformator penggeser fasa tiga *output* di sisi sekunder maka akan diperoleh *Total Harmonic Distortion* arus di bagian primer transformator yang telah tereduksi. *Total Harmonic Distortion* arus yang telah tereduksi akan diinjeksikan pada bus primer transformator pada sistem distribusi radial. Selanjutnya akan dilakukan perhitungan nilai tegangan harmonisa di setiap bus menggunakan persamaan (3.19) dimana *Total Harmonic Distortion* telah tereduksi.

BAB 4

SIMULASI SISTEM DAN ANALISA DATA

Pada bab ini keandalan aliran daya harmonisa dengan implementasi transformator menggunakan metode *backward-forward sweep* akan diuji berdasarkan hasil simulasi. Simulasi yang dilakukan antara lain :

1. Aliran daya harmonisa dengan implementasi transformator dibagi dalam keadaan:
 - a. Beban tiga fasa seimbang
 - b. Beban tiga fasa tidak seimbang

Pada kedua percobaan diatas, harmonisa yang akan diinjeksikan ke sistem menggunakan empat orde harmonisa yaitu 5, 7, 11, dan 13 dan menggunakan enam orde harmonisa yaitu 5, 7, 11, 13, 17, dan 19.

2. Aliran daya harmonisa menggunakan transformator penggeser fasa.

4.1. Aliran Daya Harmonisa dengan Implementasi Transformator

Berikut akan ditunjukkan hasil simulasi aliran daya harmonisa dengan implementasi transformator. Simulasi ini dirancang dengan menggunakan *software* MATLAB. Hasil simulasi akan dibandingkan dengan *software* ETAP untuk menguji keakuratan hasil perhitungan.

4.1.1. Beban Tiga Fasa Seimbang

Pada bagian ini akan dilakukan perhitungan aliran daya harmonisa dengan keadaan beban seimbang di tiap fasanya. Harmonisa yang dipergunakan pada simulasi ini adalah orde 5, 7, 11, dan 13. Berikut adalah hasil simulasi menggunakan *software* MATLAB sekaligus perbandingan dengan *software* ETAP.

Tabel 4.1 Perbandingan Hasil Perhitungan Aliran Daya Harmonisa dengan *Software* MATLAB dan *Software* ETAP (4 Orde Harmonisa)

Bus	Fasa	Harmonik 5		Harmonik 7		Harmonik 11		Harmonik 13	
		MATLAB	ETAP	MATLAB	ETAP	MATLAB	ETAP	MATLAB	ETAP
V1	R	0,7402	0,7261	0,2678	0,2627	0,3163	0,3103	0,3435	0,3370
	S	0,7402	0,7261	0,2678	0,2627	0,3163	0,3103	0,3435	0,3370
	T	0,7402	0,7261	0,2678	0,2627	0,3163	0,3103	0,3435	0,3370
V2	R	0,7402	0,7485	0,2678	0,2707	0,3163	0,3195	0,3435	0,3469
	S	0,7402	0,7485	0,2678	0,2707	0,3163	0,3195	0,3435	0,3469
	T	0,7402	0,7485	0,2678	0,2707	0,3163	0,3195	0,3435	0,3469
V3	R	0,7402	0,7485	0,2678	0,2707	0,3163	0,3195	0,3435	0,3469
	S	0,7402	0,7485	0,2678	0,2707	0,3163	0,3195	0,3435	0,3469
	T	0,7402	0,7485	0,2678	0,2707	0,3163	0,3195	0,3435	0,3469
V4	R	0,7433	0,7534	0,2690	0,2724	0,3176	0,3215	0,3450	0,3490
	S	0,7433	0,7534	0,2690	0,2724	0,3176	0,3215	0,3450	0,3490
	T	0,7433	0,7534	0,2690	0,2724	0,3176	0,3215	0,3450	0,3490
V5	R	0,7434	0,7535	0,2690	0,2725	0,3177	0,3215	0,3450	0,3491
	S	0,7434	0,7535	0,2690	0,2725	0,3177	0,3215	0,3450	0,3491
	T	0,7434	0,7535	0,2690	0,2725	0,3177	0,3215	0,3450	0,3491
V6	R	0,7434	0,7536	0,2690	0,2725	0,3177	0,3215	0,3450	0,3491
	S	0,7434	0,7536	0,2690	0,2725	0,3177	0,3215	0,3450	0,3491
	T	0,7434	0,7536	0,2690	0,2725	0,3177	0,3215	0,3450	0,3491
V7	R	0,7438	0,7542	0,2691	0,2727	0,3178	0,3218	0,3452	0,3494
	S	0,7438	0,7542	0,2691	0,2727	0,3178	0,3218	0,3452	0,3494
	T	0,7438	0,7542	0,2691	0,2727	0,3178	0,3218	0,3452	0,3494
V8	R	0,7441	0,7547	0,2692	0,2729	0,3180	0,3220	0,3454	0,3496
	S	0,7441	0,7547	0,2692	0,2729	0,3180	0,3220	0,3454	0,3496
	T	0,7441	0,7547	0,2692	0,2729	0,3180	0,3220	0,3454	0,3496
V9	R	0,7441	0,7548	0,2693	0,2729	0,3180	0,3220	0,3454	0,3496
	S	0,7441	0,7548	0,2693	0,2729	0,3180	0,3220	0,3454	0,3496
	T	0,7441	0,7548	0,2693	0,2729	0,3180	0,3220	0,3454	0,3496
V10	R	0,7456	0,7571	0,2698	0,2737	0,3186	0,3230	0,3460	0,3507
	S	0,7456	0,7571	0,2698	0,2737	0,3186	0,3230	0,3460	0,3507
	T	0,7456	0,7571	0,2698	0,2737	0,3186	0,3230	0,3460	0,3507
V11	R	4,7974	4,5425	1,7344	1,6923	2,0473	2,1633	2,2234	2,4618
	S	4,7974	4,5425	1,7344	1,6923	2,0473	2,1633	2,2234	2,4618
	T	4,7974	4,5425	1,7344	1,6923	2,0473	2,1633	2,2234	2,4618

Tabel 4.1 Perbandingan Hasil Perhitungan Aliran Daya Harmonisa dengan *Software* MATLAB dan *Software* ETAP (4 Orde Harmonisa)--(Lanjutan)

Bus	Fasa	Harmonik 5		Harmonik 7		Harmonik 11		Harmonik 13	
		MATLAB	ETAP	MATLAB	ETAP	MATLAB	ETAP	MATLAB	ETAP
V12	R	3,9552	3,9715	1,4291	1,4977	1,6863	1,9703	1,8312	2,0955
	S	3,9552	3,9715	1,4291	1,4977	1,6863	1,9703	1,8312	2,0955
	T	3,9552	3,9715	1,4291	1,4977	1,6863	1,9703	1,8312	2,0955
V13	R	3,9695	3,8899	1,4351	1,4473	1,6940	1,8443	1,8397	2,0955
	S	3,9695	3,8899	1,4351	1,4473	1,6940	1,8443	1,8397	2,0955
	T	3,9695	3,8899	1,4351	1,4473	1,6940	1,8443	1,8397	2,0955
V14	R	4,2654	4,2205	1,5412	1,5927	1,8186	2,0987	1,9749	2,2744
	S	4,2654	4,2205	1,5412	1,5927	1,8186	2,0987	1,9749	2,2744
	T	4,2654	4,2205	1,5412	1,5927	1,8186	2,0987	1,9749	2,2744
V15	R	3,0497	3,0566	1,1035	1,1119	1,3032	1,3340	1,4155	1,4638
	S	3,0497	3,0566	1,1035	1,1119	1,3032	1,3340	1,4155	1,4638
	T	3,0497	3,0566	1,1035	1,1119	1,3032	1,3340	1,4155	1,4638

Berdasarkan hasil simulasi pada tabel 4.1 diperoleh rata-rata *error* pada sistem kaliasin sebesar 3,01% atau 0,0301. Hal ini menunjukkan perhitungan aliran daya harmonisa dengan implementasi transformator menggunakan 4 orde harmonisa yaitu 5, 7, 11, dan 13, cukup handal karena memiliki rata-rata *error* yang kecil.

Perbandingan hasil perhitungan *Total Harmonic Distortion* (THD) di setiap bus pada sistem distribusi kaliasin antara *software* MATLAB dan *software* ETAP yaitu sebagai berikut :

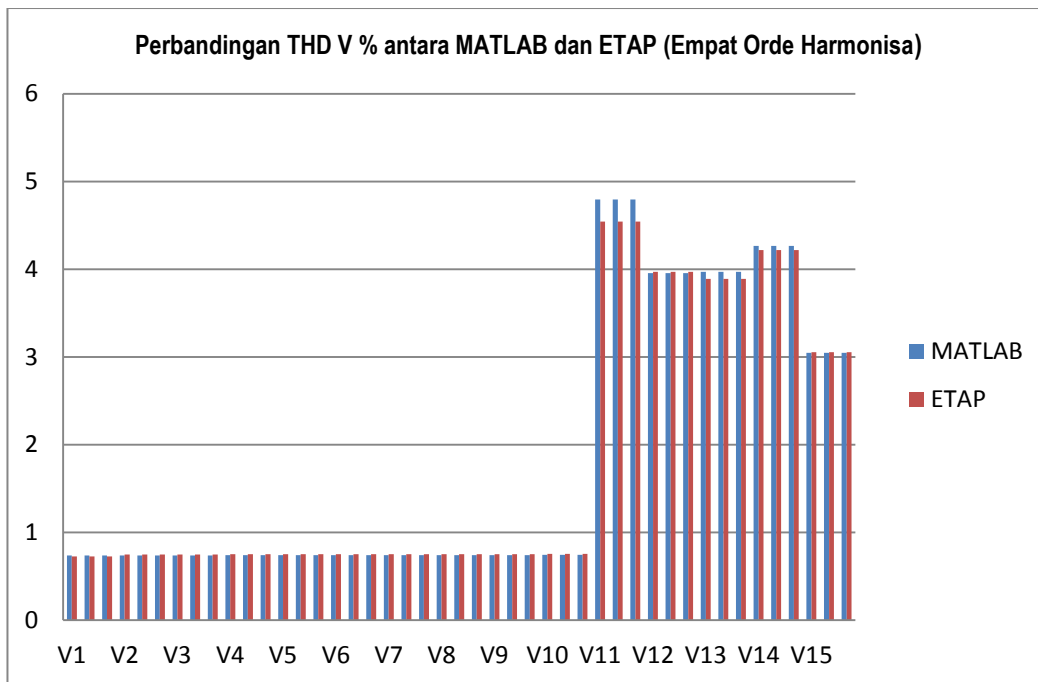
Tabel 4.2 Perbandingan *Total Harmonic Distortion* (THD) antara *Software* MATLAB dan *Software* ETAP

Bus	Fasa	THD V % MATLAB	THD V% ETAP
V1	R	0,9152	0,9
	S	0,9152	0,9
	T	0,9152	0,9
V2	R	0,9152	0,93
	S	0,9152	0,93
	T	0,9152	0,93
V3	R	0,9153	0,93
	S	0,9153	0,93
	T	0,9153	0,93
V4	R	0,9191	0,93
	S	0,9191	0,93
	T	0,9191	0,93
V5	R	0,9192	0,93
	S	0,9192	0,93
	T	0,9192	0,93
V6	R	0,9192	0,93
	S	0,9192	0,93
	T	0,9192	0,93
V7	R	0,9197	0,93
	S	0,9197	0,93
	T	0,9197	0,93
V8	R	0,9201	0,93
	S	0,9201	0,93
	T	0,9201	0,93
V9	R	0,9201	0,93
	S	0,9201	0,93
	T	0,9201	0,93
V10	R	0,9219	0,94
	S	0,9219	0,94
	T	0,9219	0,94

Tabel 4.2 Perbandingan *Total Harmonic Distortion* (THD) antara *Software* MATLAB dan *Software* ETAP--(lanjutan)

Bus	Fasa	THD V % MATLAB	THD V % ETAP
V11	R	5,9294	6,01
	S	5,9294	6,01
	T	5,9294	6,01
V12	R	4,887	5,33
	S	4,887	5,33
	T	4,887	5,33
V13	R	4,9062	5,11
	S	4,9062	5,11
	T	4,9062	5,11
V14	R	5,2703	5,68
	S	5,2703	5,68
	T	5,2703	5,68
V15	R	3,771	3,86
	S	3,771	3,86
	T	3,771	3,86

Berdasarkan hasil simulasi pada tabel 4.2, hasil perbandingan *Total Harmonic Distortion* yang diperoleh antara *software* MATLAB dan *software* ETAP memiliki rata-rata *error* sebesar 2,44% atau 0,0244. Hal ini menunjukkan perhitungan aliran daya harmonisa dengan implementasi transformator cukup handal karena memiliki rata-rata *error* yang kecil. Tabel 4.2 dapat di gambarkan pula dengan grafik sebagai berikut:



Gambar 4.1 Perbandingan *Total Harmonic Distortion* (THD) antara *Software* MATLAB dan *Software* ETAP dengan *Error* 2,44%

Tabel 4.3 Perbandingan Hasil Perhitungan Aliran Daya Harmonisa dengan *Software* MATLAB dan *Software* ETAP (6 Orde Harmonisa)

Bus	Fasa	Orde 5		Orde 7		Orde 11		Orde 13		Orde 17		Orde 19	
		MATLAB	ETAP	MATLAB	ETAP	MATLAB	ETAP	MATLAB	ETAP	MATLAB	ETAP	MATLAB	ETAP
1	R	0,74054	0,72608	0,26796	0,26273	0,31646	0,31027	0,34371	0,33696	0,19263	0,18880	0,16386	0,16058
1	S	0,74059	0,72608	0,26797	0,26273	0,31648	0,31027	0,34374	0,33696	0,19264	0,18880	0,16387	0,16058
1	T	0,74054	0,72608	0,26796	0,26273	0,31646	0,31027	0,34371	0,33696	0,19263	0,18880	0,16386	0,16058
2	R	0,74054	0,74851	0,26796	0,27070	0,31646	0,31947	0,34371	0,34688	0,19263	0,19429	0,16386	0,16523
2	S	0,74059	0,74851	0,26797	0,27070	0,31648	0,31947	0,34374	0,34688	0,19264	0,19429	0,16387	0,16523
2	T	0,74054	0,74851	0,26796	0,27070	0,31646	0,31947	0,34371	0,34688	0,19263	0,19429	0,16386	0,16523
3	R	0,74057	0,74857	0,26797	0,27072	0,31648	0,31949	0,34373	0,34690	0,19263	0,19431	0,16386	0,16524
3	S	0,74063	0,74857	0,26799	0,27072	0,31650	0,31949	0,34375	0,34690	0,19265	0,19431	0,16388	0,16524
3	T	0,74057	0,74857	0,26797	0,27072	0,31648	0,31949	0,34373	0,34690	0,19263	0,19431	0,16386	0,16524
4	R	0,74378	0,75346	0,26912	0,27245	0,31784	0,32149	0,34520	0,34906	0,19346	0,19550	0,16457	0,16626
4	S	0,74384	0,75346	0,26915	0,27245	0,31786	0,32149	0,34523	0,34906	0,19348	0,19550	0,16458	0,16626
4	T	0,74378	0,75346	0,26912	0,27245	0,31784	0,32149	0,34520	0,34906	0,19346	0,19550	0,16457	0,16626
5	R	0,74383	0,75355	0,26914	0,27248	0,31786	0,32153	0,34523	0,34910	0,19348	0,19552	0,16458	0,16627
5	S	0,74390	0,75355	0,26917	0,27248	0,31789	0,32153	0,34526	0,34910	0,19349	0,19552	0,16459	0,16627
5	T	0,74383	0,75355	0,26914	0,27248	0,31786	0,32153	0,34523	0,34910	0,19348	0,19552	0,16458	0,16627
6	R	0,74387	0,75360	0,26915	0,27250	0,31787	0,32155	0,34525	0,34912	0,19348	0,19554	0,16459	0,16628
6	S	0,74393	0,75360	0,26918	0,27250	0,31790	0,32155	0,34528	0,34912	0,19350	0,19554	0,16460	0,16628
6	T	0,74387	0,75360	0,26915	0,27250	0,31787	0,32155	0,34525	0,34912	0,19348	0,19554	0,16459	0,16628

Tabel 4.3 Perbandingan Hasil Perhitungan Aliran Daya Harmonisa dengan *Software* MATLAB dan *Software* ETAP (6 Orde Harmonisa)--(Lanjutan)

Bus	Fasa	Orde 5		Orde 7		Orde 11		Orde 13		Orde 17		Orde 19	
		MATLAB	ETAP	MATLAB	ETAP	MATLAB	ETAP	MATLAB	ETAP	MATLAB	ETAP	MATLAB	ETAP
7	R	0,74425	0,75419	0,26929	0,27271	0,31803	0,32179	0,34542	0,34938	0,19358	0,19568	0,16467	0,16641
7	S	0,74431	0,75419	0,26932	0,27271	0,31806	0,32179	0,34545	0,34938	0,19360	0,19568	0,16469	0,16641
7	T	0,74425	0,75419	0,26929	0,27271	0,31803	0,32179	0,34542	0,34938	0,19358	0,19568	0,16467	0,16641
8	R	0,74459	0,75473	0,26942	0,27290	0,31818	0,32201	0,34558	0,34962	0,19367	0,19581	0,16475	0,16652
8	S	0,74466	0,75473	0,26944	0,27290	0,31821	0,32201	0,34561	0,34962	0,19369	0,19581	0,16476	0,16652
8	T	0,74459	0,75473	0,26942	0,27290	0,31818	0,32201	0,34558	0,34962	0,19367	0,19581	0,16475	0,16652
9	R	0,74464	0,75481	0,26943	0,27293	0,31820	0,32205	0,34560	0,34966	0,19368	0,19583	0,16476	0,16653
9	S	0,74471	0,75481	0,26946	0,27293	0,31823	0,32205	0,34563	0,34966	0,19370	0,19583	0,16477	0,16653
9	T	0,74464	0,75481	0,26943	0,27293	0,31820	0,32205	0,34560	0,34966	0,19368	0,19583	0,16476	0,16653
10	R	0,74614	0,75715	0,26997	0,27376	0,31884	0,32300	0,34629	0,35069	0,19407	0,19640	0,16508	0,16702
10	S	0,74621	0,75715	0,27000	0,27376	0,31887	0,32300	0,34633	0,35069	0,19409	0,19640	0,16510	0,16702
10	T	0,74614	0,75715	0,26997	0,27376	0,31884	0,32300	0,34629	0,35069	0,19407	0,19640	0,16508	0,16702
11	R	4,80605	4,54256	1,73756	1,69227	2,05102	2,16330	2,22741	2,46184	1,24817	1,52574	1,06172	1,36702
11	S	4,80600	4,54256	1,73754	1,69227	2,05100	2,16330	2,22739	2,46184	1,24816	1,52574	1,06171	1,36702
11	T	4,80600	4,54256	1,73754	1,69227	2,05100	2,16330	2,22739	2,46184	1,24816	1,52574	1,06171	1,36702
12	R	3,96134	3,97242	1,43134	1,49803	1,68896	1,97069	1,83408	2,27490	1,02769	1,44638	0,87416	1,31012
12	S	3,96129	3,97242	1,43132	1,49803	1,68894	1,97069	1,83406	2,27490	1,02767	1,44638	0,87414	1,31012
12	T	3,96129	3,97242	1,43132	1,49803	1,68894	1,97069	1,83406	2,27490	1,02767	1,44638	0,87414	1,31012

Tabel 4.3 Perbandingan Hasil Perhitungan Aliran Daya Harmonisa dengan *software* MATLAB dan *software* ETAP (6 Orde Harmonisa)-
(Lanjutan)

Bus	Fasa	Orde 5		Orde 7		Orde 11		Orde 13		Orde 17		Orde 19	
		MATLAB	ETAP	MATLAB	ETAP	MATLAB	ETAP	MATLAB	ETAP	MATLAB	ETAP	MATLAB	ETAP
13	R	3,97863	3,88994	1,43841	1,44727	1,69791	1,84436	1,84394	2,09551	1,03328	1,29479	0,87893	1,15855
13	S	3,97857	3,88994	1,43839	1,44727	1,69789	1,84436	1,84391	2,09551	1,03327	1,29479	0,87892	1,15855
13	T	3,97857	3,88994	1,43839	1,44727	1,69789	1,84436	1,84391	2,09551	1,03327	1,29479	0,87892	1,15855
14	R	4,27225	4,22076	1,54368	1,59284	1,82152	2,09883	1,97803	2,42469	1,10835	1,54367	0,94276	1,39900
14	S	4,27219	4,22076	1,54366	1,59284	1,82149	2,09883	1,97800	2,42469	1,10833	1,54367	0,94275	1,39900
14	T	4,27219	4,22076	1,54366	1,59284	1,82149	2,09883	1,97800	2,42469	1,10833	1,54367	0,94275	1,39900
15	R	3,08350	3,05659	1,11572	1,11187	1,31768	1,33399	1,43114	1,46382	0,80205	0,84099	0,68226	0,72572
15	S	3,08344	3,05659	1,11569	1,11187	1,31765	1,33399	1,43111	1,46382	0,80203	0,84099	0,68225	0,72572
15	T	3,08344	3,05659	1,11569	1,11187	1,31765	1,33399	1,43111	1,46382	0,80203	0,84099	0,68225	0,72572

Dilakukan pula percobaan dengan 6 orde harmonisa yaitu orde 5, 7, 11, 13, 17, dan 19 untuk menguji keandalan dari pemodelan yang telah dirancang. Berdasarkan hasil simulasi pada tabel 4.3 diperoleh rata-rata *error* pada sistem kaliasin sebesar 4,62% atau 0,0462. Hal ini menunjukkan aliran daya dengan implementasi transformator yang dirancang sangat baik karena memiliki rata-rata *error* yang kecil yaitu dibawah 5% atau 0,05.

Perbandingan hasil perhitungan *Total Harmonic Distortion* (THD) di setiap bus pada sistem distribusi kaliasin antara *software* MATLAB dan *software* ETAP yaitu sebagai berikut :

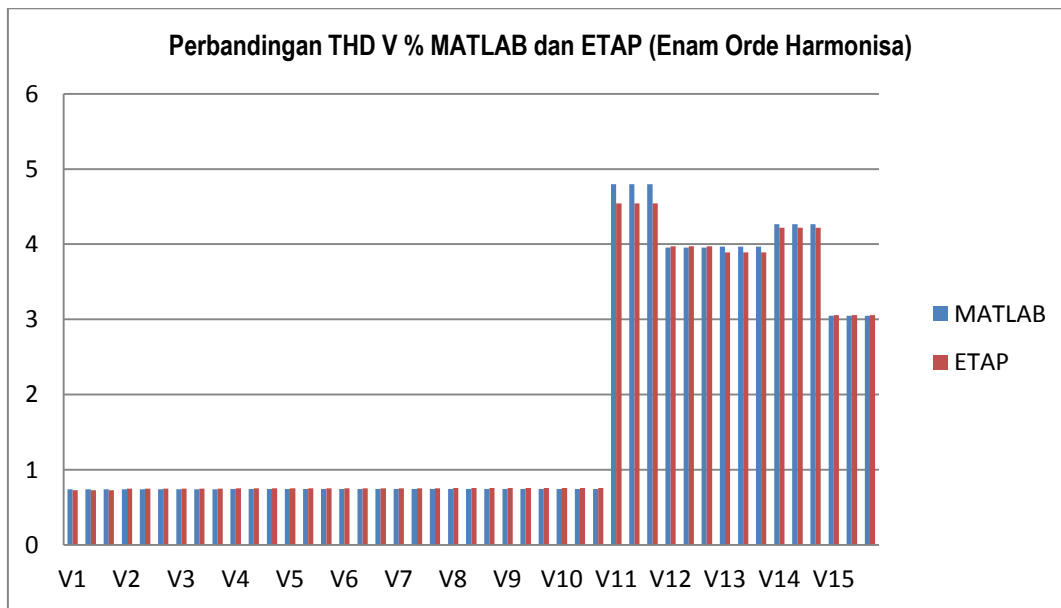
Tabel 4.4 Perbandingan *Total Harmonic Distortion* (THD) antara *Software* MATLAB dan *Software* ETAP (6 Orde Harmonisa)

VBUS	Fasa	THD V% MATLAB	THD V% ETAP
V1	R	0,94996	0,93
	S	0,95003	0,93
	T	0,94996	0,93
V2	R	0,94996	0,96
	S	0,95003	0,96
	T	0,94996	0,96
V3	R	0,95001	0,96
	S	0,95008	0,96
	T	0,95001	0,96
V4	R	0,95411	0,97
	S	0,95419	0,97
	T	0,95411	0,97
V5	R	0,95418	0,97
	S	0,95426	0,97
	T	0,95418	0,97
V6	R	0,95422	0,97
	S	0,95431	0,97
	T	0,95422	0,97

Tabel 4,4 Perbandingan *Total Harmonic Distortion* (THD) antara *Software* MATLAB dan *Software* ETAP (6 Orde Harmonisa)—(Lanjutan)

VBUS	Fasa	THD V% MATLAB	THD V% ETAP
V7	R	0,95471	0,97
	S	0,9548	0,97
	T	0,95471	0,97
V8	R	0,95515	0,97
	S	0,95524	0,97
	T	0,95515	0,97
V9	R	0,95522	0,97
	S	0,95531	0,97
	T	0,95522	0,97
V10	R	0,95713	0,97
	S	0,95723	0,97
	T	0,95713	0,97
V11	R	6,16202	6,36
	S	6,16195	6,36
	T	6,16195	6,36
V12	R	5,07718	5,69
	S	5,07711	5,69
	T	5,07711	5,69
V13	R	5,10115	5,41
	S	5,10107	5,41
	T	5,10107	5,41
V14	R	5,47566	6,06
	S	5,47558	6,06
	T	5,47558	6,06
V15	R	3,9555	4,02
	S	3,95542	4,02
	T	3,95542	4,02

Berdasarkan hasil simulasi pada tabel 4.4, hasil perbandingan *Total Harmonic Distortion* (THD) yang diperoleh antara *software* MATLAB dan *software* ETAP memiliki rata-rata *error* sebesar 3,0% atau 0,03. Hal ini menunjukkan aliran daya harmonisa dengan implementasi transformator (6 orde harmonisa) cukup handal karena memiliki rata-rata *error* yang kecil. Tabel 4.4 dapat di gambarkan pula dengan grafik sebagai berikut:



Gambar 4.2 Perbandingan *Total Harmonic Distortion* (THD) antara *Software* Matlab dan *Software* Etap (6 Orde Harmonisa) dengan *Error* 3,0%

4.1.2. Beban Tiga Fasa Tidak Seimbang

Perhitungan aliran daya harmonisa dengan beban seimbang memiliki hasil yang mendekati dengan perhitungan *software* ETAP yaitu nilai *error* yang kecil. Proses perhitungan yang sama pada beban seimbang akan dipergunakan untuk aliran daya harmonisa dengan beban tidak seimbang. Berikut adalah aliran daya harmonisa dengan orde harmonisa 5, 7, 11, dan 13.

Tabel 4.5 Hasil Aliran Daya Harmonisa dengan Beban Tidak Seimbang (4 Orde Harmonisa)

Bus	Fasa	Orde 5	Orde 7	Orde 11	Orde 13	THD V%
1	R	0,68324	0,14464	0,29198	0,31712	0,82071
1	S	0,72647	0,1581	0,31045	0,33718	0,8734
1	T	0,8111	0,1765	0,34662	0,37646	0,97514
2	R	0,68324	0,14464	0,29198	0,31712	0,82071
2	S	0,72647	0,1581	0,31045	0,33718	0,8734
2	T	0,8111	0,1765	0,34662	0,37646	0,97514
3	R	0,68327	0,14465	0,29199	0,31713	0,82074
3	S	0,72651	0,15812	0,31047	0,3372	0,87345
3	T	0,81114	0,17651	0,34663	0,37648	0,97519
4	R	0,68628	0,14528	0,29327	0,31852	0,82434
4	S	0,72957	0,15873	0,31176	0,33861	0,87711
4	T	0,81469	0,17724	0,34814	0,37811	0,97944
5	R	0,68631	0,14529	0,29328	0,31853	0,82438
5	S	0,72963	0,15875	0,31179	0,33864	0,87718
5	T	0,81475	0,17726	0,34816	0,37814	0,97952
6	R	0,68634	0,1453	0,29329	0,31855	0,82442
6	S	0,72963	0,15875	0,31179	0,33864	0,87719
6	T	0,81482	0,17728	0,34819	0,37818	0,9796
7	R	0,68677	0,14538	0,29347	0,31874	0,82493
7	S	0,73003	0,15881	0,31196	0,33882	0,87765
7	T	0,81515	0,17731	0,34833	0,37833	0,97999
8	R	0,68713	0,14546	0,29363	0,31891	0,82537
8	S	0,73043	0,15892	0,31212	0,339	0,87814
8	T	0,81544	0,17739	0,34845	0,37846	0,98034
9	R	0,68718	0,14547	0,29365	0,31893	0,82542
9	S	0,7304	0,15886	0,31211	0,33899	0,8781
9	T	0,81556	0,17736	0,34851	0,37851	0,98047
10	R	0,68873	0,14579	0,29431	0,31965	0,82728
10	S	0,73182	0,15905	0,31271	0,33964	0,87977
10	T	0,8171	0,17755	0,34915	0,37922	0,98229

Tabel 4.5 Hasil Aliran Daya Harmonisa dengan Beban Tidak Seimbang (4 Orde Harmonisa)—(Lanjutan)

Bus	Fasa	Orde 5	Orde 7	Orde 11	Orde 13	THD V%
11	R	3,79463	1,36988	1,61916	1,75838	4,68928
11	S	5,65095	2,0277	2,41166	2,61907	6,98001
11	T	4,86851	1,75691	2,07723	2,25581	6,01604
12	R	2,27439	0,81978	0,96935	1,0526	2,80936
12	S	4,73979	1,69708	2,02093	2,19459	5,85201
12	T	4,7949	1,72855	2,04371	2,21923	5,9229
13	R	2,79411	1,00826	1,19217	1,29466	3,45269
13	S	2,93365	1,04509	1,25202	1,3597	3,62144
13	T	6,07805	2,19414	2,59343	2,81641	7,51099
14	R	4,44392	1,60374	1,89435	2,05708	5,49004
14	S	4,84268	1,73474	2,06484	2,24228	5,97932
14	T	3,42936	1,23634	1,46153	1,58703	4,23601
15	R	3,13799	1,18226	1,34097	1,45644	3,89412
15	S	2,83665	1,03471	1,21219	1,31657	3,50998
15	T	3,09285	1,13409	1,32169	1,4355	3,82876

Berdasarkan tabel 4.5 diperoleh hasil perhitungan aliran daya harmonisa dengan sistem tidak seimbang. Diperoleh pula *Total Harmonic Distortion* (THD) tegangan disetiap bus pada sistem distribusi kaliasin. Harmonisa di bus 11, 12, dan 13 pada fasa tertentu, baik secara *Individual Harmonic Distortion* (IHD) maupun *Total Harmonic Distortion* (THD) cukup besar yaitu melebihi 3% untuk IHD dan 5% untuk THD, hal ini disebabkan bus tersebut berada di sisi beban, dimana beban merupakan sumber harmonisa. Berikut adalah hasil perhitungan aliran daya pada sistem kaliasin dengan orde harmonisa 5, 7, 11, 13, 17, dan 19.

Tabel 4.6 Hasil Aliran Daya Harmonisa dengan Beban Tidak Seimbang (6 Orde Harmonisa)

Bus	Fasa	Orde 5	Orde 7	Orde 11	Orde 13	Orde 17	Orde 19	THD V%
1	R	0,68324	0,14464	0,29198	0,31712	0,17772	0,15118	0,853228
1	S	0,72647	0,15810	0,31045	0,33718	0,18897	0,16074	0,907946
1	T	0,81110	0,17650	0,34662	0,37646	0,21098	0,17947	1,01372
2	R	0,68324	0,14464	0,29198	0,31712	0,17772	0,15118	0,853228
2	S	0,72647	0,15810	0,31045	0,33718	0,18897	0,16074	0,907946
2	T	0,81110	0,17650	0,34662	0,37646	0,21098	0,17947	1,01372
3	R	0,68327	0,14465	0,29199	0,31713	0,17773	0,15119	0,853264
3	S	0,72651	0,15812	0,31047	0,33720	0,18898	0,16075	0,907998
3	T	0,81114	0,17651	0,34663	0,37648	0,21099	0,17948	1,013765
4	R	0,68628	0,14528	0,29327	0,31852	0,17851	0,15185	0,857008
4	S	0,72957	0,15873	0,31176	0,33861	0,18976	0,16142	0,911801
4	T	0,81469	0,17724	0,34814	0,37811	0,21190	0,18026	1,01818
5	R	0,68631	0,14529	0,29328	0,31853	0,17851	0,15185	0,85705
5	S	0,72963	0,15875	0,31179	0,33864	0,18978	0,16144	0,911882
5	T	0,81475	0,17726	0,34816	0,37814	0,21192	0,18027	1,018263
6	R	0,68634	0,14530	0,29329	0,31855	0,17852	0,15186	0,857092
6	S	0,72963	0,15875	0,31179	0,33864	0,18978	0,16144	0,911886
6	T	0,81482	0,17728	0,34819	0,37818	0,21194	0,18029	1,018354
7	R	0,68677	0,14538	0,29347	0,31874	0,17863	0,15195	0,857617
7	S	0,73003	0,15881	0,31196	0,33882	0,18988	0,16152	0,91237
7	T	0,81515	0,17731	0,34833	0,37833	0,21202	0,18036	1,018756
8	R	0,68713	0,14546	0,29363	0,31891	0,17873	0,15203	0,858074
8	S	0,73043	0,15892	0,31212	0,33900	0,18998	0,16161	0,912873
8	T	0,81544	0,17739	0,34845	0,37846	0,21210	0,18042	1,019117
9	R	0,68718	0,14547	0,29365	0,31893	0,17874	0,15204	0,858129
9	S	0,73040	0,15886	0,31211	0,33899	0,18998	0,16160	0,912831
9	T	0,81556	0,17736	0,34851	0,37851	0,21213	0,18045	1,019257
10	R	0,68873	0,14579	0,29431	0,31965	0,17914	0,15238	0,860059
10	S	0,73182	0,15905	0,31271	0,33964	0,19034	0,16191	0,91457
10	T	0,81710	0,17755	0,34915	0,37922	0,21252	0,18078	1,021146

Tabel 4.6 Hasil Aliran Daya Harmonisa dengan Beban Tidak Seimbang (6 Orde Harmonisa)—(Lanjutan)

Bus	Fasa	Orde 5	Orde 7	Orde 11	Orde 13	Orde 17	Orde 19	THD V%
11	R	3,79463	1,36988	1,61916	1,75838	0,98532	0,83813	4,864428
11	S	5,65095	2,0277	2,41166	2,61907	1,46765	1,24842	7,241068
11	T	4,86851	1,75691	2,07723	2,25581	1,26404	1,07521	6,240719
12	R	2,27439	0,81978	0,96935	1,0526	0,58977	0,50165	2,9141
12	S	4,73979	1,69708	2,02093	2,19459	1,2297	1,04599	6,070608
12	T	4,7949	1,72855	2,04371	2,21923	1,24343	1,05765	6,14373
13	R	2,79411	1,00826	1,19217	1,29466	0,72547	0,61709	3,581642
13	S	2,93365	1,04509	1,25202	1,3597	0,76194	0,64813	3,757052
13	T	6,07805	2,19414	2,59343	2,81641	1,57818	1,34243	7,791513
14	R	4,44392	1,60374	1,89435	2,05708	1,15261	0,9804	5,694756
14	S	4,84268	1,73474	2,06484	2,24228	1,25642	1,06872	6,20266
14	T	3,42936	1,23634	1,46153	1,58703	0,88919	0,75634	4,393916
15	R	3,13799	1,18226	1,34097	1,45644	0,81623	0,69432	4,038867
15	S	2,83665	1,03471	1,21219	1,31657	0,73784	0,62764	3,641198
15	T	3,09285	1,13409	1,32169	1,4355	0,80449	0,68434	3,971762

Berdasarkan tabel 4.6 diperoleh hasil perhitungan aliran daya harmonisa dengan sistem tidak seimbang untuk 6 orde harmonisa Diperoleh pula *Total Harmonic Distortion* (THD) tegangan disetiap bus pada sistem distribusi kaliasin. Harmonisa di bus 11, 12, 13, dan 14 pada fasa tertentu, baik secara *Individual Harmonic Distortion* (IHD) maupun *Total Harmonic Distortion* (THD) cukup besar yaitu melebihi 3% untuk IHD dan 5% untuk THD, hal ini disebabkan bus tersebut berada di sisi beban, dimana beban merupakan sumber harmonisa. Dihitung pula keadaan beban tidak seimbang dengan orde harmonisa sebagai berikut :

Tabel 4.7 Injeksi Arus Harmonisa

Orde	Magnitude(%)	Sudut
5	23,52	111
7	6,08	109
11	4,57	-158
13	4,2	-178
17	1,8	-94
19	1,37	-92
23	0,76	-70
25	0,56	-70
29	0,49	-20
31	0,54	7

Dari tabel 4.8 diperoleh hasil perhitungan aliran daya harmonisa disetiap bus dengan 10 orde harmonisa. Harmonisa di bus 11, 12, 13, dan 14 pada fasa tertentu, baik secara *Individual Harmonic Distortion* (IHD) maupun *Total Harmonic Distortion* (THD) cukup besar yaitu melebihi 3% untuk IHD dan 5% untuk THD, hal ini disebabkan bus tersebut berada di sisi beban, dimana beban merupakan sumber harmonisa.

Tabel 4.8 Hasil Aliran Daya Harmonisa dengan Beban Tidak Seimbang (10 Orde Harmonisa)

Bus	Fasa	Orde 5	Orde 7	Orde 11	Orde 13	Orde 17	Orde 19	Orde 23	Orde 25	Orde 29	Orde 31	THD V%
1	R	0,68324	0,14464	0,29198	0,31712	0,17772	0,15118	0,10019	0,08131	0,08253	0,09722	0,872301
1	S	0,72647	0,15810	0,31045	0,33718	0,18897	0,16074	0,10652	0,08645	0,08775	0,10337	0,92821
1	T	0,81110	0,17650	0,34662	0,37646	0,21098	0,17947	0,11893	0,09653	0,09797	0,11542	1,036345
2	R	0,68324	0,14464	0,29198	0,31712	0,17772	0,15118	0,10019	0,08131	0,08253	0,09722	0,872301
2	S	0,72647	0,15810	0,31045	0,33718	0,18897	0,16074	0,10652	0,08645	0,08775	0,10337	0,92821
2	T	0,81110	0,17650	0,34662	0,37646	0,21098	0,17947	0,11893	0,09653	0,09797	0,11542	1,036345
3	R	0,68327	0,14465	0,29199	0,31713	0,17773	0,15119	0,10019	0,08131	0,08253	0,09723	0,872338
3	S	0,72651	0,15812	0,31047	0,33720	0,18898	0,16075	0,10653	0,08646	0,08775	0,10338	0,928263
3	T	0,81114	0,17651	0,34663	0,37648	0,21099	0,17948	0,11894	0,09653	0,09798	0,11542	1,036391
4	R	0,68628	0,14528	0,29327	0,31852	0,17851	0,15185	0,10063	0,08167	0,08289	0,09765	0,876165
4	S	0,72957	0,15873	0,31176	0,33861	0,18976	0,16142	0,10697	0,08682	0,08812	0,10381	0,93215
4	T	0,81469	0,17724	0,34814	0,37811	0,21190	0,18026	0,11945	0,09695	0,09840	0,11592	1,040904
5	R	0,68631	0,14529	0,29328	0,31853	0,17851	0,15185	0,10063	0,08167	0,08290	0,09766	0,876208
5	S	0,72963	0,15875	0,31179	0,33864	0,18978	0,16144	0,10698	0,08683	0,08813	0,10382	0,932233
5	T	0,81475	0,17726	0,34816	0,37814	0,21192	0,18027	0,11946	0,09696	0,09841	0,11593	1,040988
6	R	0,68634	0,14530	0,29329	0,31855	0,17852	0,15186	0,10064	0,08168	0,08290	0,09766	0,87625
6	S	0,72963	0,15875	0,31179	0,33864	0,18978	0,16144	0,10698	0,08683	0,08813	0,10382	0,932237
6	T	0,81482	0,17728	0,34819	0,37818	0,21194	0,18029	0,11947	0,09696	0,09842	0,11594	1,041081
7	R	0,68677	0,14538	0,29347	0,31874	0,17863	0,15195	0,10070	0,08173	0,08295	0,09772	0,876787
7	S	0,73003	0,15881	0,31196	0,33882	0,18988	0,16152	0,10704	0,08687	0,08817	0,10387	0,932731
7	T	0,81515	0,17731	0,34833	0,37833	0,21202	0,18036	0,11952	0,09700	0,09846	0,11599	1,041492

Tabel 4.8 Hasil Aliran Daya Harmonisa dengan Beban Tidak Seimbang (10 Orde Harmonisa)—(Lanjutan)

Bus	Fasa	Orde 5	Orde 7	Orde 11	Orde 13	Orde 17	Orde 19	Orde 23	Orde 25	Orde 29	Orde 31	THD V%
8	R	0,68713	0,14546	0,29363	0,31891	0,17873	0,15203	0,10075	0,08177	0,08299	0,09777	0,877254
8	S	0,73043	0,15892	0,31212	0,339	0,18998	0,16161	0,1071	0,08692	0,08822	0,10393	0,933245
8	T	0,81544	0,17739	0,34845	0,37846	0,2121	0,18042	0,11956	0,09704	0,09849	0,11603	1,041861
9	R	0,68718	0,14547	0,29365	0,31893	0,17874	0,15204	0,10076	0,08177	0,083	0,09778	0,877311
9	S	0,7304	0,15886	0,31211	0,33899	0,18998	0,1616	0,10709	0,08692	0,08822	0,10393	0,933203
9	T	0,81556	0,17736	0,34851	0,37851	0,21213	0,18045	0,11958	0,09705	0,09851	0,11604	1,042004
10	R	0,68873	0,14579	0,29431	0,31965	0,17914	0,15238	0,10098	0,08196	0,08319	0,098	0,879284
10	S	0,73182	0,15905	0,31271	0,33964	0,19034	0,16191	0,1073	0,08708	0,08839	0,10412	0,93498
10	T	0,8171	0,17755	0,34915	0,37922	0,21252	0,18078	0,1198	0,09723	0,09869	0,11626	1,043935
11	R	3,79463	1,36988	1,61916	1,75838	0,98532	0,83813	0,55539	0,45075	0,45749	0,53894	4,967298
11	S	5,65095	2,0277	2,41166	2,61907	1,46765	1,24842	0,82729	0,67141	0,68147	0,8028	7,3944
11	T	4,86851	1,75691	2,07723	2,25581	1,26404	1,07521	0,71249	0,57824	0,5869	0,69138	6,372679
12	R	2,27439	0,81978	0,96935	1,0526	0,58977	0,50165	0,33241	0,26977	0,27381	0,32255	2,975612
12	S	4,73979	1,69708	2,02093	2,19459	1,2297	1,04599	0,69313	0,56253	0,57095	0,67259	6,198991
12	T	4,7949	1,72855	2,04371	2,21923	1,24343	1,05765	0,70083	0,56877	0,57727	0,68004	6,273419
13	R	2,79411	1,00826	1,19217	1,29466	0,72547	0,61709	0,40892	0,33187	0,33684	0,39681	3,65738
13	S	2,93365	1,04509	1,25202	1,3597	0,76194	0,64813	0,42949	0,34857	0,35379	0,41678	3,836702
13	T	6,07805	2,19414	2,59343	2,81641	1,57818	1,34243	0,88957	0,72195	0,73276	0,86321	7,956275

Tabel 4.8 Hasil Aliran Daya Harmonisa dengan Beban Tidak Seimbang (10 Orde Harmonisa)—(Lanjutan)

Bus	Fasa	Orde 5	Orde 7	Orde 11	Orde 13	Orde 17	Orde 19	Orde 23	Orde 25	Orde 29	Orde 31	THD V%
14	R	4,44392	1,60374	1,89435	2,05708	1,15261	0,9804	0,64965	0,52724	0,53513	0,63039	5,814984
14	S	4,84268	1,73474	2,06484	2,24228	1,25642	1,06872	0,70819	0,57475	0,58336	0,68721	6,333833
14	T	3,42936	1,23634	1,46153	1,58703	0,88919	0,75634	0,50117	0,40673	0,41281	0,4863	4,486646
15	R	3,13799	1,18226	1,34097	1,45644	0,81623	0,69432	0,46012	0,37343	0,37903	0,44651	4,123911
15	S	2,83665	1,03471	1,21219	1,31657	0,73784	0,62764	0,41593	0,33757	0,34263	0,40363	3,718278
15	T	3,09285	1,13409	1,32169	1,4355	0,80449	0,68434	0,45351	0,36806	0,37358	0,4401	4,055771

4.1.3. Aliran Daya Harmonisa dengan Menggunakan Transformator Penggeser Fasa

Penelitian ini akan menggunakan transformator penggeser fasa dengan tiga *output* di sisi sekunder pada sistem distribusi kaliasin. Desain ini diharapkan dapat mengurangi harmonisa arus di sisi primer transformator. Percobaan akan menggunakan data beban tiga fasa seimbang dengan orde harmonisa 5, 7, 11, dan 13 kemudian dilanjutkan menggunakan orde harmonisa 5, 7, 11, 13, 17, dan 19.

Tabel 4.9 Harmonisa Arus di Sisi Primer Transformator Sistem Distribusi Kaliasin

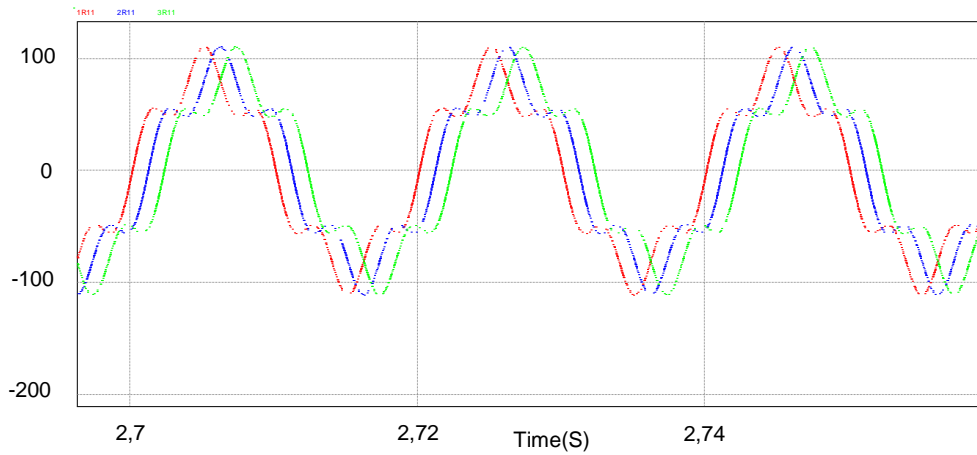
BUS	Fasa	Orde 5	Orde 7	Orde 11	Orde 13	THD Arus% Setelah Mitigasi	THD Arus% Sebelum Mitigasi
1	R	0,000349	0,000296	0,000073	0,000277	0,002177	24,62
1	S	0,001071	0,000352	0,000228	0,000259	0,004754	24,62
1	T	0,000980	0,000447	0,000289	0,000492	0,004915	24,62
2	R	0,000349	0,000296	0,000073	0,000277	0,002177	24,62
2	S	0,001071	0,000352	0,000228	0,000259	0,004754	24,62
2	T	0,000980	0,000447	0,000289	0,000492	0,004915	24,62
3	R	0,000043	0,000036	0,000009	0,000034	0,002165	24,43
3	S	0,000131	0,000044	0,000028	0,000032	0,004739	24,43
3	T	0,000120	0,000055	0,000036	0,000060	0,004908	24,43
4	R	0,000306	0,000260	0,000063	0,000243	0,002179	24,65
4	S	0,000940	0,000309	0,000200	0,000228	0,004756	24,65
4	T	0,000860	0,000392	0,000253	0,000432	0,004915	24,65
5	R	0,000034	0,000028	0,000008	0,000027	0,002157	24,49
5	S	0,000104	0,000035	0,000022	0,000025	0,004728	24,49
5	T	0,000095	0,000044	0,000029	0,000048	0,004898	24,49
6	R	0,000055	0,000046	0,000012	0,000044	0,002169	24,54
6	S	0,000170	0,000056	0,000036	0,000041	0,004750	24,54
6	T	0,000155	0,000071	0,000046	0,000078	0,004917	24,54
7	R	0,000217	0,000185	0,000044	0,000173	0,002185	24,7
7	S	0,000666	0,000218	0,000142	0,000162	0,004762	24,7
7	T	0,000609	0,000277	0,000178	0,000306	0,004918	24,7

Tabel 4.9 Harmonisa Arus di Sisi Primer Transformator Sistem Distribusi Kaliasin (Lanjutan)

BUS	Fasa	Orde 5	Orde 7	Orde 11	Orde 13	THD Arus% Setelah Mitigasi	THD Arus% Sebelum Mitigasi
8	R	0,000037	0,000031	0,000008	0,000029	0,002159	24,45
8	S	0,000112	0,000037	0,000024	0,000027	0,004732	24,45
8	T	0,000103	0,000047	0,000031	0,000051	0,004901	24,45
9	R	0,000181	0,000155	0,000036	0,000144	0,002190	24,75
9	S	0,000554	0,000181	0,000117	0,000135	0,004769	24,75
9	T	0,000506	0,000230	0,000148	0,000255	0,004921	24,75
10	R	0,000181	0,000155	0,000036	0,000144	0,002190	24,75
10	S	0,000554	0,000181	0,000117	0,000135	0,004769	24,75
10	T	0,000506	0,000230	0,000148	0,000255	0,004921	24,75

Berdasarkan tabel 4.9 diperoleh harmonisa arus di sisi primer transformator mengalami penurunan. *Total Harmonic Distortion* (THD) arus pada bus 1 fasa R tanpa menggunakan transformator penggeser fasa adalah sebesar 24,6%. Hal ini berarti harmonisa turun 99% setelah menggunakan transformator penggeser fasa yaitu menjadi 0,002177%. Berdasarkan tabel diatas rata-rata penurunan harmonisa pada fasa R, S, dan T adalah sebesar 99%, akibat harmonisa arus pada orde tertentu yang muncul di sisi beban saling meniadakan.

Berikut adalah hasil simulasi pada sisi *output* transformator penggeser fasa:



Gambar 4.3 Gelombang Arus pada Masing-masing *Output* Transformator Penggeser Fasa

Gambar 4.3 menunjukkan gelombang pada fasa R, S, dan T di sisi *output* transformator penggeser fasa. Berdasarkan teori yang telah di paparkan pada bab sebelumnya, perbedaan sudut fasa antar *output* transformator penggeser fasa dengan tiga *output* di sisi sekunder sebesar 20^0 agar dapat meniadakan harmonik 3-15. Berikut merupakan perhitungan perbedaan sudut gelombang antar *output* dari hasil simulasi (gambar 4.3).

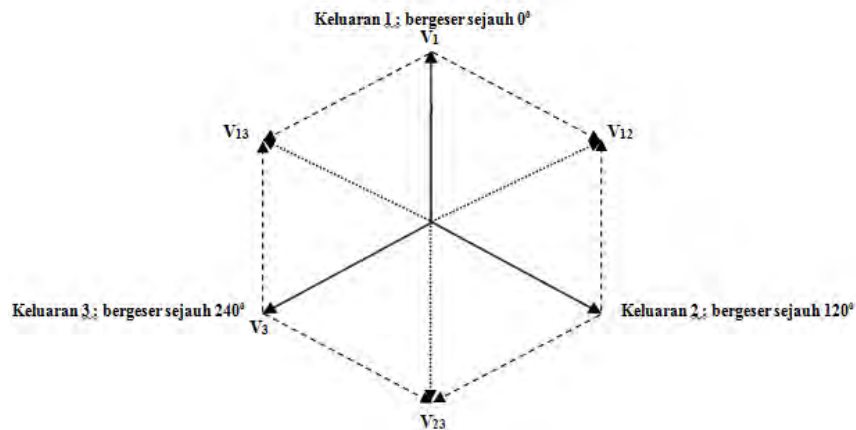
$$\theta^{\circ} = \frac{T_{Rwinding3} - T_{Rwinding2}}{0,02} \times 360^{\circ} = \frac{2,7022948 - 2,7011735}{0,02} \times 360^{\circ} = 20,183^{\circ}$$

$$\theta^{\circ} = \frac{T_{Rwinding3} - T_{Rwinding2}}{0,02} \times 360^{\circ} = \frac{2,7011735 - 2,7000522}{0,02} \times 360^{\circ} = 20,183^{\circ}$$

Hasil simulasi menunjukkan transformator penggeser fasa dengan tiga *output* di sisi sekunder memiliki perbedaan sudut antar *output* sebesar 20^0 , sejalan dengan hal ini tabel 4.9 menunjukkan harmonisa 5-13 mengalami penurunan hingga mendekati nol, hal ini disebabkan sebagai berikut :

Transformator penggeser fasa dirancang berbeda fasa sejauh 20° pada masing-masing keluarannya. *Output* pertama 0° , *output* kedua 20° , dan *output* ketiga 40° . Misalnya pada harmonisa orde ke 5, *output* pertama memiliki

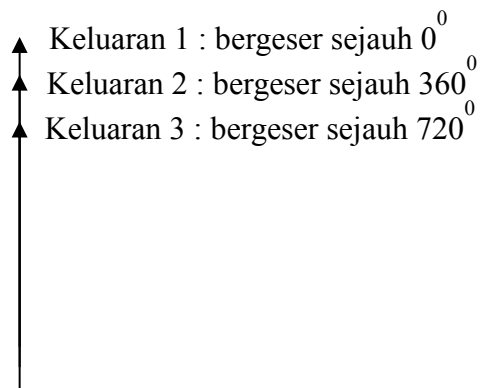
pergeseran sudut sebesar $5 \times 0^\circ = 0^\circ$. *Output* kedua $5 \times 20^\circ = 100^\circ$ berarti setelah digeser 20° posisi vektor menjadi $100^\circ + 20^\circ = 120^\circ$. *Output* ketiga $5 \times 40^\circ = 200^\circ$ berarti setelah digeser 40° posisi vektor menjadi $200^\circ + 40^\circ = 240^\circ$. Bila digambarkan secara vektor akan menghasilkan resultan sebagai berikut.



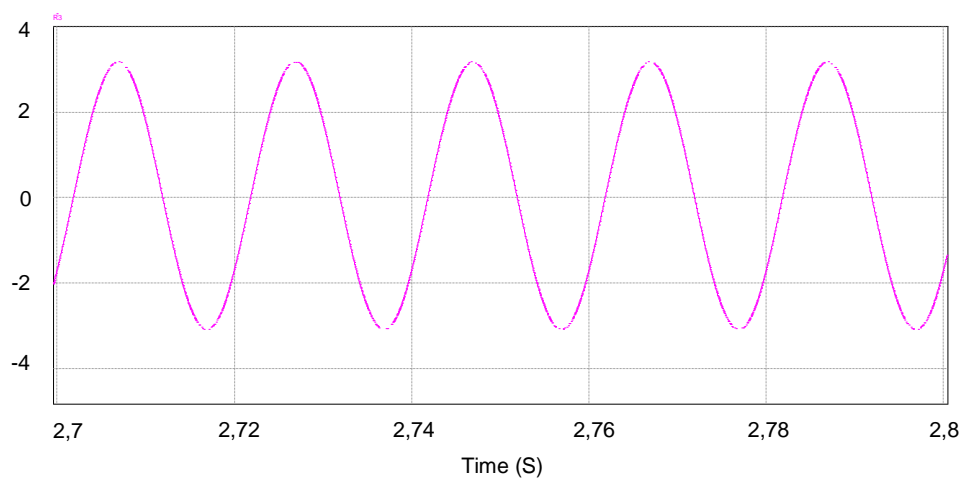
Gambar 4.4 Vektor harmonisa ke 5 pada fasa R

Seperti yang ditunjukkan pada gambar 4.4, ketiga *output* dan resultannya saling meniadakan. V_1 saling meniadakan dengan resultan V_{23} , begitu pula dengan V_2 saling meniadakan dengan resultan V_{13} dan V_3 saling meniadakan dengan resultan V_{12} sehingga harmonisa ke 5 tereduksi. Hal yang sama terjadi hingga orde ke 15.

Harmonisa muncul kembali pada orde ke 17 dan ke 19, hal ini terjadi dikarenakan ketiga vektor keluaran saling menjumlahkan yaitu sebagai berikut: Harmonisa ke 17 pada *output* pertama akan bergeser sejauh $17 \times 0^\circ = 0^\circ$. *Output* kedua $17 \times 20^\circ = 340^\circ$ berarti setelah digeser 20° posisi vektor menjadi $340^\circ + 20^\circ = 360^\circ$. *Output* ketiga $17 \times 40^\circ = 680^\circ$ berarti setelah digeser 40° posisi vektor menjadi $680^\circ + 40^\circ = 720^\circ$. Bila digambarkan secara vektor akan menghasilkan resultan sebagai berikut.



Gambar 4.5 Vektor pada Harmonisa ke 17 pada Fasa R dengan Pergeseran Fasa Sejauh 20°



Gambar 4.6 Gelombang Arus pada Fasa R di Sisi Primer Transformator Penggeser Fasa Tiga *Output* di Sisi Sekunder

Gambar 4.6 menunjukkan gelombang arus yang dihasilkan pada sisi primer transformator, bentuk gelombang arus yang dihasilkan lebih mendekati sinusoidal. Penurunan THD arus pada sistem mempengaruhi penurunan yang terjadi pada THD tegangan yaitu sebagai berikut :

Tabel 4.10 Harmonisa Tegangan di Sisi Primer Transformator Sistem Distribusi Kaliasin

BUS	Fasa	Orde 5	Orde 7	Orde 11	Orde 13	THD Arus% Setelah Mitigasi	THD Arus% Sebelum Mitigasi
1	R	0,012274	0,014557	0,005630	0,025277	0,000114	0,9
	S	0,037628	0,017326	0,017648	0,023663	0,000180	0,9
	T	0,034432	0,021996	0,022345	0,044899	0,000229	0,9
2	R	0,012274	0,014557	0,005630	0,025277	0,000114	0,93
	S	0,037628	0,017326	0,017648	0,023663	0,000180	0,93
	T	0,034432	0,021996	0,022345	0,044899	0,000229	0,93
3	R	0,012275	0,014557	0,005631	0,025278	0,000114	0,93
	S	0,037630	0,017327	0,017649	0,023664	0,000180	0,93
	T	0,034433	0,021997	0,022346	0,044901	0,000229	0,93
4	R	0,012326	0,014618	0,005654	0,025383	0,000114	0,93
	S	0,037786	0,017398	0,017722	0,023762	0,000181	0,93
	T	0,034576	0,022088	0,022438	0,045086	0,000230	0,93
5	R	0,012327	0,014619	0,005654	0,025384	0,000114	0,93
	S	0,037789	0,017399	0,017723	0,023763	0,000181	0,93
	T	0,034579	0,022089	0,022440	0,045089	0,000230	0,93
6	R	0,012327	0,014619	0,005654	0,025386	0,000114	0,93
	S	0,037791	0,017400	0,017724	0,023764	0,000181	0,93
	T	0,034580	0,022090	0,022441	0,045091	0,000230	0,93
7	R	0,012333	0,014627	0,005657	0,025398	0,000114	0,93
	S	0,037809	0,017409	0,017732	0,023776	0,000181	0,93
	T	0,034597	0,022101	0,022451	0,045113	0,000230	0,93
8	R	0,012339	0,014633	0,005660	0,025409	0,000114	0,93
	S	0,037826	0,017416	0,017740	0,023787	0,000181	0,93
	T	0,034613	0,022111	0,022461	0,045133	0,000230	0,93
9	R	0,012340	0,014634	0,005660	0,025411	0,000114	0,93
	S	0,037828	0,017417	0,017741	0,023788	0,000181	0,93
	T	0,034615	0,022112	0,022463	0,045136	0,000230	0,93
10	R	0,012363	0,014662	0,005670	0,025459	0,000115	0,94
	S	0,037901	0,017451	0,017775	0,023834	0,000181	0,94
	T	0,034682	0,022154	0,022505	0,045222	0,000231	0,94

Berdasarkan tabel 4.10 diperoleh harmonisa tegangan di sisi primer mengalami penurunan. *Total Harmonic Distortion* (THD) tegangan pada bus 1 fasa R tanpa menggunakan transformator penggeser fasa adalah sebesar 0,9%. Hal ini berarti harmonisa turun 99% setelah menggunakan transformator penggeser fasa yaitu menjadi 0,000114%. Berdasarkan tabel diatas rata-rata penurunan harmonisa pada fasa R, S, dan T adalah sebesar 99%.

Tabel 4.11 Harmonisa Arus di Sisi Primer Transformator Sistem Distribusi Kaliasin dengan Tiga *Output* Transformator (6 orde harmonisa)

BUS	Fasa	Orde 5	Orde 7	Orde 11	Orde 13	Orde 17	Orde 19	THD Arus% Setelah Mitigasi	THD Arus% Sebelum Mitigasi
1	R	0,000349	0,000296	7,29E-05	0,000277	0,440391	0,334782	2,230231	24,72
	S	0,001071	0,000352	0,000228	0,000259	0,440085	0,335052	2,229962	24,72
	T	0,00098	0,000447	0,000289	0,000492	0,440359	0,334777	2,230158	24,72
2	R	0,000349	0,000296	7,28E-05	0,000277	0,440391	0,334782	2,230231	24,72
	S	0,001071	0,000352	0,000228	0,000259	0,440085	0,335052	2,229961	24,72
	T	0,00098	0,000447	0,000289	0,000492	0,440359	0,334777	2,230158	24,72
3	R	4,29E-05	3,58E-05	9,43E-06	3,38E-05	0,053941	0,041006	2,222279	24,53
	S	0,000131	4,35E-05	2,82E-05	3,16E-05	0,053903	0,041039	2,22201	24,53
	T	0,00012	5,52E-05	3,59E-05	6,01E-05	0,053937	0,041005	2,222207	24,53
4	R	0,000306	0,00026	6,34E-05	0,000243	0,38645	0,293776	2,23134	24,75
	S	0,00094	0,000309	0,0002	0,000228	0,386181	0,294013	2,231071	24,75
	T	0,00086	0,000392	0,000253	0,000432	0,386422	0,293772	2,231267	24,75
5	R	3,40E-05	2,84E-05	7,56E-06	2,68E-05	0,042802	0,032538	2,216935	24,59
	S	0,000104	3,46E-05	2,24E-05	2,51E-05	0,042773	0,032564	2,216667	24,59
	T	9,54E-05	4,38E-05	2,85E-05	4,77E-05	0,042799	0,032538	2,216863	24,59

Tabel 4.11 Harmonisa Arus di Sisi Primer Transformator Sistem Distribusi Kaliasin dengan Tiga *Output* Transformator (6 orde harmonisa)—(Lanjutan)

BUS	Fasa	Orde 5	Orde 7	Orde 11	Orde 13	Orde 17	Orde 19	THD Arus% Setelah Mitigasi	THD Arus% Sebelum Mitigasi
6	R	5,53E-05	4,64E-05	1,21E-05	4,37E-05	0,069705	0,052989	2,226921	24,64
	S	0,00017	5,61E-05	3,64E-05	4,09E-05	0,069656	0,053032	2,226651	24,64
	T	0,000155	7,12E-05	4,63E-05	7,77E-05	0,0697	0,052988	2,226849	24,64
7	R	0,000217	0,000185	4,38E-05	0,000173	0,273943	0,208249	2,23471	24,8
	S	0,000666	0,000218	0,000142	0,000162	0,273752	0,208417	2,23444	24,8
	T	0,000609	0,000277	0,000178	0,000306	0,273923	0,208246	2,234637	24,8
8	R	3,65E-05	3,06E-05	8,12E-06	2,88E-05	0,046069	0,035021	2,218771	24,55
	S	0,000112	3,72E-05	2,41E-05	2,70E-05	0,046036	0,035049	2,218502	24,55
	T	0,000103	4,71E-05	3,07E-05	5,13E-05	0,046065	0,03502	2,218699	24,55
9	R	0,000181	0,000155	3,57E-05	0,000144	0,227874	0,173228	2,237926	24,85
	S	0,000554	0,000181	0,000117	0,000135	0,227716	0,173367	2,237656	24,85
	T	0,000506	0,00023	0,000148	0,000255	0,227858	0,173226	2,237852	24,85
10	R	0,000181	0,000155	3,57E-05	0,000144	0,227874	0,173228	2,237926	24,85
	S	0,000554	0,000181	0,000117	0,000135	0,227716	0,173367	2,237656	24,85
	T	0,000506	0,00023	0,000148	0,000255	0,227858	0,173226	2,237852	24,85

Berdasarkan tabel 4.11 harmonisa dengan tiga *output* di sisi sekunder yang memiliki perbedaan fasa sejauh 20^0 akan meniadakan harmonik hingga orde ke 15 dan muncul kembali pada orde ke 17 dan 19. *Total Harmonic Distortion* (THD) arus pada bus 1 fasa R tanpa menggunakan transformator penggeser fasa adalah sebesar 24,72%. Hal ini berarti harmonisa turun 90,98% setelah menggunakan transformator penggeser fasa yaitu menjadi 2,230231%. Berdasarkan tabel diatas rata-rata penurunan harmonisa pada fasa R, S, dan T adalah sebesar 90,97%.

Tabel 4.12 dibawah ini menunjukkan harmonisa tegangan di sisi primer mengalami penurunan. *Total Harmonic Distortion* (THD) tegangan pada bus 1 fasa R tanpa menggunakan transformator penggeser fasa adalah sebesar 0,93%. Hal ini berarti harmonisa turun 99% setelah menggunakan transformator penggeser fasa yaitu menjadi 0,0006794%. Berdasarkan tabel dibawah ini rata-rata penurunan harmonisa pada fasa R, S, dan T adalah sebesar 99%.

Tabel 4.12 Harmonisa Tegangan di Sisi Primer Transformator Sistem Distribusi Kaliasin dengan Tiga *Output* Transformator (6 orde harmonisa)

BUS	Fasa	Orde 5	Orde 7	Orde 11	Orde 13	Orde 17	Orde 19	THD V% Setelah Mitigasi	THD V% Sebelum Mitigasi
1	R	0,137339	0,095834	0,060122	0,050734	3,87E-02	3,46E-02	6,79E-04	0,93
	S	0,136632	0,095328	0,059799	0,050461	3,85E-02	3,44E-02	6,76E-04	0,93
	T	0,031434	0,015721	0,006293	0,004498	2,63E-03	2,10E-03	1,28E-04	0,93
2	R	0,137180	0,095666	0,060433	0,050855	1,67	1,41	7,76E-03	0,96
	S	0,137639	0,095161	0,060047	0,050053	1,71	1,41	7,86E-03	0,96
	T	0,032666	0,015402	0,006860	0,004839	1,70	1,44	7,88E-03	0,96
3	R	0,137179	0,095666	0,060433	0,050855	1,67	1,42	7,78E-03	0,96
	S	0,137642	0,095160	0,060047	0,050052	1,71	1,41	7,88E-03	0,96
	T	0,032669	0,015401	0,006861	0,004839	1,70	1,44	7,89E-03	0,96
4	R	0,137145	0,095628	0,060502	0,050883	2,05	1,74	9,53E-03	0,97
	S	0,137865	0,095123	0,060103	0,049961	2,09	1,73	9,62E-03	0,97
	T	0,032948	0,015330	0,006987	0,004922	2,08	1,76	9,65E-03	0,97
5	R	0,137144	0,095628	0,060504	0,050883	2,06	1,74	9,56E-03	0,97
	S	0,137869	0,095123	0,060104	0,049959	2,10	1,74	9,65E-03	0,97
	T	0,032953	0,015329	0,006990	0,004923	2,09	1,77	9,68E-03	0,97

Tabel 4.12 Harmonisa Tegangan di Sisi Primer Transformator Sistem Distribusi Kaliasin dengan Tiga *Output* Transformator (6 orde harmonisa)—(Lanjutan)

BUS	Fasa	Orde 5	Orde 7	Orde 11	Orde 13	Orde 17	Orde 19	THD V% Setelah Mitigasi	THD V% Sebelum Mitigasi
6	R	0,137144	0,095627	0,060504	0,050884	2,06	1,75	9,58E-03	0,97
	S	0,137871	0,095122	0,060105	0,049958	2,10	1,74	9,67E-03	0,97
	T	0,032956	0,015328	0,006991	0,004924	2,09	1,77	9,70E-03	0,97
7	R	0,13714	0,095623	0,060513	0,050887	2,10	1,78	9,78E-03	0,97
	S	0,137898	0,095118	0,060112	0,049948	2,15	1,78	9,88E-03	0,97
	T	0,032989	0,01532	0,007006	0,004934	2,13	1,8	9,90E-03	0,97
8	R	0,137136	0,095619	0,06052	0,05089	2,15	1,82	9,97E-03	0,97
	S	0,137922	0,095114	0,060117	0,049938	2,19	1,81	1,01E-02	0,97
	T	0,03302	0,015312	0,00702	0,004943	2,18	1,84	1,01E-02	0,97
9	R	0,137136	0,095618	0,060521	0,05089	2,15	1,82	1,00E-02	0,97
	S	0,137925	0,095113	0,060119	0,049936	2,19	1,82	1,01E-02	0,97
	T	0,033024	0,015311	0,007022	0,004944	2,18	1,85	1,01E-02	0,97
10	R	0,13712	0,0956	0,060553	0,050903	2,33	1,97	1,08E-02	0,97
	S	0,138029	0,095096	0,060145	0,049894	2,37	1,97	1,09E-02	0,97
	T	0,033156	0,015279	0,007081	0,004984	2,36	2,00	1,09E-02	0,97

Tabel 4.13 Harmonisa Arus di Sisi Primer Transformator Sistem Distribusi Kaliasin dengan Tiga *Output* Transformator Beban Tidak Seimbang (6 orde harmonisa)

BUS	Fasa	Fundamental	Orde 5	Orde 7	Orde 11	Orde 13	Orde 17	Orde 19	THD Arus% Setelah Mitigasi	THD Arus% Sebelum Mitigasi
1	R	2,47E+01	4,05E-01	1,44E-01	1,56E-01	5,07E-02	3,54E-01	2,54E-01	2,561692	24,58381
	S	2,47E+01	4,03E-01	1,44E-01	1,56E-01	5,05E-02	3,53E-01	2,55E-01	2,555473	24,59861
	T	2,47E+01	4,04E-01	1,43E-01	1,56E-01	4,50E-03	3,54E-01	2,54E-01	2,551211	24,59845
2	R	2,47E+01	4,05E-01	1,44E-01	1,56E-01	4,61E-01	3,54E-01	2,54E-01	3,160323	24,58381
	S	2,47E+01	4,03E-01	1,44E-01	1,56E-01	4,16E-01	3,53E-01	2,55E-01	3,052136	24,59861
	T	2,47E+01	4,04E-01	1,43E-01	1,56E-01	4,55E-01	3,54E-01	2,54E-01	3,144457	24,59845
3	R	3,03	4,15E-02	1,31E-02	4,85E-02	4,63E-01	4,62E-02	3,37E-02	15,51578	25,07301
	S	3,03	4,14E-02	1,31E-02	4,85E-02	4,18E-01	4,61E-02	3,37E-02	14,07095	25,07369
	T	3,03	4,13E-02	1,31E-02	4,85E-02	4,57E-01	4,62E-02	3,37E-02	15,33168	25,07369
4	R	2,17E+01	4,00E-01	1,38E-01	1,27E-01	5,52E-01	3,08E-01	2,21E-01	3,696012	24,62074
	S	2,17E+01	3,99E-01	1,38E-01	1,27E-01	5,45E-01	3,08E-01	2,21E-01	3,669962	24,61073
	T	2,17E+01	3,97E-01	1,38E-01	1,27E-01	5,07E-01	3,07E-01	2,21E-01	3,54974	24,60165
5	R	2,41	1,23E-01	3,52E-02	5,04E-02	5,54E-01	3,14E-02	2,23E-02	23,72868	25,07271
	S	2,41	1,23E-01	3,52E-02	5,03E-02	5,08E-01	3,14E-02	2,23E-02	21,9077	25,07287
	T	2,41	1,23E-01	3,51E-02	5,04E-02	5,47E-01	3,14E-02	2,23E-02	23,43555	25,07381

Tabel 4.13 Harmonisa Arus di Sisi Primer Transformator Sistem Distribusi Kaliasin Dengan Tiga *Output* Transformator Beban Tidak Seimbang (6 orde harmonisa)—(Lanjutan)

BUS	Fasa	Fundamental	Orde 5	Orde 7	Orde 11	Orde 13	Orde 17	Orde 19	THD Arus% Setelah Mitigasi	THD Arus% Sebelum Mitigasi
6	R	3,92	3,06E-01	8,44E-02	4,25E-02	5,57E-01	6,19E-02	4,57E-02	16,51128	25,07385
	S	3,92	3,05E-01	8,45E-02	4,25E-02	5,11E-01	6,19E-02	4,58E-02	15,51774	25,07346
	T	3,92	3,05E-01	8,43E-02	4,25E-02	5,49E-01	6,20E-02	4,57E-02	16,34311	25,07378
7	R	1,54E+01	3,64E-01	1,21E-01	1,05E-01	5,64E-01	2,50E-01	1,86E-01	4,919386	24,79158
	S	1,54E+01	3,63E-01	1,21E-01	1,05E-01	5,18E-01	2,50E-01	1,86E-01	4,699131	24,75315
	T	1,54E+01	3,65E-01	1,21E-01	1,05E-01	5,55E-01	2,50E-01	1,86E-01	4,879777	24,83758
8	R	2,59	1,13E-01	3,48E-02	1,87E-02	5,75E-01	4,04E-02	2,97E-02	22,7687	25,07374
	S	2,59	1,13E-01	3,49E-02	1,87E-02	5,29E-01	4,04E-02	2,97E-02	21,03233	25,07395
	T	2,59	1,13E-01	3,48E-02	1,88E-02	5,66E-01	4,04E-02	2,97E-02	22,40649	25,07449
9	R	1,28E+01	2,62E-01	8,73E-02	8,82E-02	5,73E-01	2,14E-01	1,61E-01	5,43826	25,07341
	S	1,28E+01	2,62E-01	8,75E-02	8,82E-02	5,27E-01	2,14E-01	1,61E-01	5,142271	25,07349
	T	1,28E+01	2,63E-01	8,72E-02	8,84E-02	5,63E-01	2,15E-01	1,60E-01	5,376306	25,07355
10	R	1,28E+01	2,62E-01	8,73E-02	8,82E-02	6,10E-01	2,14E-01	1,61E-01	5,678136	25,07341
	S	1,28E+01	2,62E-01	8,75E-02	8,82E-02	5,63E-01	2,14E-01	1,61E-01	5,369609	25,07349
	T	1,28E+01	2,63E-01	8,72E-02	8,84E-02	5,96E-01	2,15E-01	1,60E-01	5,591626	25,07355

Tabel 4.14 Harmonisa Tegangan di Sisi Primer Transformator Sistem Distribusi Kaliasin dengan Tiga *Output* Transformator
Beban Tidak Seimbang (6 orde harmonisa)

BUS	Fasa	Orde 5	Orde 7	Orde 11	Orde 13	Orde 17	Orde 19	THD Arus% Setelah Mitigasi	THD Arus% Sebelum Mitigasi
1	R	0,1373390	0,0000004	0,0000002	0,1537149	0,0386874	0,0345880	0,0007515	0,827193
	S	0,1366330	0,0000004	0,0000002	0,1540946	0,0384778	0,0344014	0,0007507	0,826065
	T	0,0314336	0,0000003	0,0000003	0,1537469	0,0026272	0,0021031	0,0005550	0,825721
2	R	0,6222173	0,2365028	0,3930123	0,1537149	1,3259825	1,0624090	0,0066250	0,827193
	S	0,5063770	0,2354645	0,3932991	0,1540945	1,3385735	1,0686869	0,0065452	0,826065
	T	0,4736490	0,2357795	0,3932365	0,1537469	1,3664912	1,0927072	0,0066358	0,825721
3	R	0,6223277	0,2367003	0,3947373	0,0514791	1,3295342	1,0653000	0,0066214	0,827192
	S	0,5062882	0,2356600	0,3950255	0,0515614	1,3421199	1,0715825	0,0065414	0,826064
	T	0,4738809	0,2359734	0,3949596	0,0514913	1,3700441	1,0955989	0,0066327	0,825721
4	R	0,7458712	0,2945196	0,4720235	0,1227502	1,6295467	1,3059485	0,0080990	0,827091
	S	0,6289765	0,2932417	0,4723672	0,1230498	1,6423977	1,3118795	0,0080187	0,826009
	T	0,5960679	0,2936557	0,4723306	0,1227284	1,6702831	1,3360392	0,0081089	0,825770
5	R	0,7477316	0,2954294	0,4739942	0,0528738	1,6320722	1,3073440	0,0081027	0,827090
	S	0,6299163	0,2941506	0,4743349	0,0529686	1,6448277	1,3133567	0,0080211	0,826008
	T	0,5984563	0,2945588	0,4742938	0,0528823	1,6727865	1,3374594	0,0081129	0,825771

Tabel 4.14 Harmonisa Tegangan di Sisi Primer Transformator Sistem Distribusi Kaliasin Dengan Tiga *Output* Transformator Beban Tidak Seimbang (6 orde harmonisa)—(Lanjutan)

BUS	Fasa	Orde 5	Orde 7	Orde 11	Orde 13	Orde 17	Orde 19	THD Arus% Setelah Mitigasi	THD Arus% Sebelum Mitigasi
6	R	0,7567035	0,2984128	0,4761973	0,0432834	1,6372721	1,3118252	0,0081375	0,827089
	S	0,6380463	0,2971293	0,4765434	0,0433843	1,6499907	1,3178745	0,0080539	0,826008
	T	0,6078323	0,2975394	0,4765011	0,0432859	1,6779790	1,3419500	0,0081465	0,835772
7	R	0,7549121	0,3002414	0,4803512	0,1168659	1,6781685	1,3462225	0,0083210	0,827075
	S	0,6414847	0,2989231	0,4807089	0,1170845	1,6913594	1,3518337	0,0082461	0,826001
	T	0,6030727	0,2993703	0,4806905	0,1168051	1,7190138	1,3761958	0,0083316	0,825777
8	R	0,7567151	0,3053566	0,4899064	0,0206344	1,7055139	1,3674630	0,0084346	0,827063
	S	0,6486705	0,3039947	0,4902785	0,0206697	1,7192524	1,3725766	0,0083667	0,825995
	T	0,6022509	0,3044808	0,4902703	0,0206359	1,7465083	1,3972650	0,0084450	0,825782
9	R	0,7642407	0,3051046	0,4868336	0,0970966	1,7213093	1,3822924	0,0085175	0,827061
	S	0,6530963	0,3037555	0,4872034	0,0972764	1,7347028	1,3877083	0,0084462	0,825995
	T	0,6111386	0,3042281	0,4872002	0,0970310	1,7622244	1,4121884	0,0085288	0,825783
10	R	0,8015546	0,3243660	0,5129925	0,0970966	1,8841999	1,5184945	0,0092768	0,827010
	S	0,6987796	0,3229014	0,5134165	0,0972764	1,8982823	1,5232450	0,0092180	0,825972
	T	0,6445579	0,3234709	0,5134644	0,0970310	1,9253535	1,5481158	0,0092907	0,825807

Pada tabel 4.13 ini percobaan dilakukan dengan beban di masing-masing *output* trafo tidak sama besar. Diperoleh *Total Harmonic Distortion* (THD) arus pada bus 1 fasa R tanpa menggunakan transformator penggeser fasa adalah sebesar 24,58381%. Hal ini berarti harmonisa turun 89,58% setelah menggunakan transformator penggeser fasa yaitu menjadi 2,561692%. Berdasarkan tabel diatas rata-rata penurunan harmonisa pada fasa R, S, dan T masing-masing 58,435%, 61,212% dan 58,987%.

Pada tabel 4.14 ini percobaan dilakukan dengan beban di masing-masing *output* trafo tidak sama besar. Diperoleh *Total Harmonic Distortion* (THD) tegangan pada bus 1 fasa R tanpa menggunakan transformator penggeser fasa adalah sebesar 0,827193%. Hal ini berarti harmonisa turun 99% setelah menggunakan transformator penggeser fasa yaitu menjadi 0,0081375%. Berdasarkan tabel diatas rata-rata penurunan harmonisa pada fasa R, S, dan T masing-masing 99%.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB 5

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Setelah dilakukan percobaan dan analisa dari hasil simulasi, maka diperoleh kesimpulan sebagai berikut :

1. Aliran daya harmonisa dengan mempertimbangkan transformator menggunakan metode *backward-forward sweep* cukup handal digunakan untuk menghitung *individual harmonic distortion* dan *total harmonic distortion* pada sistem distribusi radial. Hal ini ditunjukkan dari perbandingan hasil simulasi *software* MATLAB dengan *software* ETAP untuk keadaan beban tiga fasa seimbang, dimana rata-rata *error* 3,01% untuk *individual harmonic distortion* dan 2,44% untuk *total harmonic distortion* disetiap bus dengan empat orde harmonisa. Selain itu percobaan dengan enam orde harmonisa diperoleh rata-rata *error* sebesar 4,62% untuk *individual harmonic distortion* dan 3,0% untuk *total harmonic distortion* disetiap bus. Aliran daya dengan implementasi transformator yang dirancang sangat baik karena memiliki rata-rata *error* yang kecil yaitu dibawah 5%.
2. Berdasarkan poin nomor 1, aliran daya harmonisa untuk beban tiga fasa tidak seimbang dapat dihitung untuk memperoleh *individual harmonic distortion* dan *total harmonic distortion* pada sistem.
3. Pergeseran fasa pada transformator dapat dilakukan dengan menggunakan sebuah rangkaian delta pada sisi primer dan beberapa rangkaian zig-zag pada sisi sekunder trafo. Pada rangkaian zig-zag, besar setiap lengan dapat diatur sedemikian untuk menghasilkan pergeseran fasa sesuai kebutuhan.
4. Transformator penggeser fasa mengurangi harmonisa arus dengan memanfaatkan perbedaan sudut antar *output* agar orde harmonik tertentu saling meniadakan, pada proses ini tidak ada daya yang hilang atau terserap. Hal ini menunjukkan performa transformator penggeser fasa lebih baik dibandingkan filter pasif.

5. Melalui hasil simulasi ditunjukkan bahwa transformator penggeser fasa dengan tiga *output* di sisi sekunder ketika menggunakan beban yang sama besar pada masing-masing *output* dapat menurunkan harmonisa arus hingga 99% untuk simulasi 4 orde harmonisa dan 90,97% untuk simulasi 6 orde harmonisa. Selain itu harmonisa tegangan turun hingga 99% pada simulasi 4 orde harmonisa maupun 6 orde harmonisa.
6. Melalui hasil simulasi ditunjukkan bahwa transformator penggeser fasa dengan tiga *output* di sisi sekunder ketika menggunakan beban tidak sama besar di masing-masing *output* rata-rata dapat menurunkan harmonisa arus pada fasa R, S, dan T masing-masing 58,435%, 61,212% dan 58,987, sedangkan harmonisa tegangan pada fasa R,S,dan T masing-masing 99%.
7. Berdasarkan poin nomor 5 dan 6 di atas, menunjukkan bahwa transformer penggeser fasa tiga output di sisi sekunder memiliki hasil yang lebih baik dibandingkan dengan transformator distribusi dengan koneksi delta di sisi primer dan Y (bintang) di sisi sekunder. Transformator ini selain mengalirkan daya listrik sekaligus dapat meniadakan harmonisa hingga orde ke 15.

5.2. Saran

1. Penelitian dapat dilanjutkan dengan menguji kinerja transformator penggeser fasa secara nyata, perlu dibuat sebuah prototype dari sistem tersebut.
2. Pengaruh kenaikan suhu masih belum diperhitungkan, sehingga penelitian dapat dilanjutkan untuk menganalisa keakuratan pemodelan terkait dengan peningkatan suhu.
3. Mengulas dari sisi analisa biaya (ekonomis) menggunakan filter harmonisa (filter aktif) dibandingkan dengan penerapan transformator penggeser fasa pada sistem distribusi radial tiga fasa.

DAFTAR PUSTAKA

- Akhmad Danyal, Ontoseno Penangsang, dan Dimas Anton Asfani. (2013), *Pemodelan Sistem Distribusi Radial Untuk Studi Aliran Daya Harmonisa Tiga Fasa*, Jurnal Teknik POMITS Vol. 1, No. 1, (2013) 1-6.
- C. Sankaran. (2002), *Power Quality*, CRC, United States of America.
- Hodalén, H.K., dkk. (2005), "Using Zigzag Transformers with Phase-shift To Reduce Harmonics in AC-DC System", Montreal, Canada.
- IEEE. (1993), *IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems*, Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc, United States of America.
- J.Nanda, M.S.Srinivas. M.Shma, S.S.Dev, dan L.L.Lai. (2000), *New Findings On Radial Distribution System Load Flow Algorithms*, IEEE.
- John B. Kammeter, dkk. (1991), "Transformer With Cancellation Of Harmonic Currents By Phase Shifted Secondary Windings", United States.
- Mamdouh Abdel-Akher dan Karar Mahmoud. (2013), *Implementation Of Three-Phase Transformer Model In Radial Load-Flow Analysis*, Ain Shams Engineering Journal (2013) 4, 65–73.
- Pungki Priambodo, Ontoseno Penangsang, dan Rony Seto Wibowo. (2013), "Analisis Aliran Daya Tiga Fasa Tidak Seimbang Menggunakan Metode K-Matrik dan Z_{BR} pada Sistem Distribusi 20 kV Kota Surabaya", Jurusan Teknik Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS), Surabaya.
- Philip J.A. Ling, dkk. (2004), "Designing Modern Electrical Systems With Transformers That Inherently Reduce Harmonic Distortion In A Pc-Rich Environment", Powersmiths International Corp.
- Soebagio. (2012), *Transformator*, ITS Press, Surabaya.
- Syaain, Matt. (2013), *Handout Power Flow Analysis*, PPNS-ITS, Surabaya.
- Zuhal. (1991), *Dasar Tenaga Listrik*, Bandung : Institut Teknologi Bandung.

BIOGRAFI PENULIS



Ribka Stephani dilahirkan pada tanggal 30 September 1990 di Palangkaraya-Kalimantan Tengah, merupakan anak kedua dari pasangan Alm. Drs.Ledy B. Ekot dan Dra. Sumarnie.D. Tagab, M.Pd. Riwayat pendidikan penulis adalah SDN Langkai 12 Palangkaraya(1996 – 2000), SMPN 2 Palangkaraya(2002-2005), SMAN 2 Palangkaraya (2005-2008)dengan penjurusan Ilmu Alam, S1 Teknik Sistem Tenaga Teknik Elektro Universitas Kristen Petra Surabaya (2008 – 2012), dan S2 Teknik Sistem Tenaga Teknik Elektro ITS Surabaya (2013 – 2015). Memiliki pengalaman bekerja selama 3 (tiga) tahun (2012-sekarang) sebagai Design Engineer (*Electrical Consultant and Power Quality Specialist*) di PT. Pancaran Energi Trimanunggal. Selama menempuh pendidikan sarjana, selain aktif melakukan penelitian pada labolatorium sistem tenaga listrik, penulis juga aktif sebagai pengurus berbagai organisasi dan UKM. Sedangkan selama menempuh pendidikan magister, penulis aktif melakukan penelitian di labolatorium Sistem Tenaga Listrik.